



Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial

Redes de Petri no auxílio à Gestão da Fiabilidade em Manutenção

Uma abordagem à análise da fiabilidade do grupo eletrogénico de um
hospital de padrões Europeus, utilizando Redes de Petri

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Autor

Vassili Gonçalves Coelho

Orientador

José Manuel Torres Farinha

Professor do Departamento de Engenharia e Gestão Industrial
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, junho, 2019

AGRADECIMENTOS

Quero dirigir um agradecimento especial à minha família pelo apoio incondicional que sempre estive disposta a prestar de modo a que alcançasse os meus objetivos.

Ao meu orientador, Professor José Manuel Torres Farinha, expresso o meu profundo agradecimento, por acreditar, e pelo constante incentivo dado ao longo da realização deste trabalho.

Agradecer ao meu amigo Adriano Lopes, pelo apoio e pela disponibilidade em contribuir com informações muito úteis para a realização do meu trabalho.

Ao Engenheiro Victor Pais e ao Engenheiro Pedro Teixeira pela abertura demonstrada em facilitar o contacto no terreno com o sistema estudado.

Ao meu amigo Constâncio Pinto, pelo apoio e partilha de informações na investigação das Redes de Petri.

RESUMO

Um hospital para ter um funcionamento adequado da sua infraestrutura de fornecimento de energia, carece de uma boa manutenção para garantir a sua fiabilidade e a sua máxima disponibilidade integrada.

O tema aqui apresentado, propõe o uso das Redes de Petri (RdP) para auxiliar a gestão de operação e manutenção do sistema de energia elétrica numa unidade hospitalar de padrão europeu. O propósito do estudo centra-se na identificação e análise das potenciais falhas do atual sistema e em recomendar soluções para planeamento das operações e manutenção, de forma a garantir a maximização da disponibilidade e fiabilidade destes ativos.

Para apresentar soluções concretas e objetivas torna-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia de planeamento de manutenção que integra os vários subsistemas de fornecimento de energia, suportados pela modelação dinâmica que se encontra construída essencialmente com base no diagrama de blocos do sistema, e transpostas para uma representação gráfica através de RdP.

As RdP correspondem a uma ferramenta de modelação, análise formal e simulação de sistemas de eventos discretos, que permite obter a representação gráfica (possibilitando uma visualização simultânea da sua estrutura e comportamentos) de sistemas dinâmicos e complexos, alicerçada numa forte base matemática.

Especificamente, pode dizer-se que as RdP modelam três aspetos desses sistemas, eventos, condições e as relações entre eles. De acordo com esta caracterização, em cada estado do sistema verificam-se determinadas condições. Estes podem possibilitar a ocorrência de eventos que por sua vez podem proporcionar a mudança de estado no sistema.

Com o presente estudo, procura-se explorar uma ferramenta que reúne inúmeras potencialidades que são capazes de enriquecer ainda mais a área da gestão da manutenção.

Palavras-Chaves: Gestão da manutenção; Redes de Petri; Modelação dinâmica.

ABSTRACT

For a hospital to have proper functioning of its energy supply infrastructure, it requires good maintenance to ensure its reliability and its maximum integrated availability.

The subject presented here, propose the use of Petri Nets (PN) to assist the management of operation and maintenance of the electric power system in a hospital of European standard. The purpose of this study is to identify and analyse potential failures of the current system and recommend solutions for operations and maintenance planning in order to maximize the availability and reliability of these assets.

In order to present concrete and objective solutions, it is necessary to develop a maintenance planning methodology that integrates the various subsystems of energy supply, supported by dynamic modelling that is built essentially on the block diagram of the system and transposed to a graphical representation through Petri Net.

Petri Nets correspond to a tool for modelling, formal analysis and simulation of discrete event systems, which allows graphical representation (allowing a simultaneous visualization of its structure and behaviour) of dynamic and complex systems, based on a strong mathematical basis.

Specifically, it can be said that Petri Nets model two aspects of these systems, events, conditions, and relationships between them. According to this characterization, in each state of the system certain conditions are verified. These can enable the occurrence of events that in turn can provide the state change in the system.

With the present study, we seek to explore a tool that has many potentialities that can further enrich the area of maintenance management.

Keywords: Maintenance management; Petri Nets; Dynamic modelling.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GERAL	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIMBOLOGIAS E ABREVIATURAS	XV
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e Pertinência do Tema.	1
1.2 Definição dos objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
Capítulo 2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE.....	5
2.1 Processo de manutenção	5
2.2 Sistemas Dinâmicos de Eventos Discretos (SDED)	6
2.3 Redes de Petri	7
2.4 Semântica de Execução de Redes de Petri.....	9
2.4.1 Notação gráfica utilizado na modelação de Redes de Petri.....	9
2.4.2 Definição formal de Redes de Petri	11
2.4.3 Redes de Petri marcadas	13
2.4.4 Pré e Pós-condições dos elementos	15
2.4.5 Matriz de Incidência	17
2.4.6 Execução do disparo das transições.....	18
2.4.7 Rede pura e <i>self-loop</i>	22
2.4.8 Equação fundamental	23
2.5 Classes das Redes de Petri	24
2.6 Poder representacional	25
2.7 Propriedades das redes de Petri.....	27
2.8 Fiabilidade de modelação (modelação) com <i>Stochastic</i> Redes de Petri	27
CAPÍTULO 3. ESTUDO DE CASO.....	29

3.1.1	Caraterização do Edifício	29
3.2	Caraterização do Sistema de Alimentação Elétrica	29
3.2.1	Posto de seccionamento e de transformação	30
3.2.2	Quadros Gerais de Baixa Tensão	32
3.2.3	Compensação de fator de potência	35
3.2.4	Alimentação ininterrupta de energia elétrica (UPS).....	36
3.2.5	Central de emergência	40
3.3	Estratégia de Construção do Modelo da RdP do sistema	43
3.3.1	Identificação do sistema	44
3.3.2	Definição do sistema	45
3.3.3	Modelação do sistema com Diagrama de Blocos Funcional	47
3.4	Modelação do Sistema Elétrico do Hospital por Redes de Petri	48
3.4.1	Simulação computacional.....	50
CAPÍTULO 4.	SOLUÇÃO PROPOSTA	57
CAPÍTULO 5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação dos arcos	11
Figura 2.2 – Exemplo de RdP definida como um quádruplo	12
Figura 2.3 – Rede marcada R	14
Figura 2.4 – Exemplo de RdP da linha de montagem	16
Figura 2.5 – Rede habilitada para disparo de transição t_1	20
Figura 2.6 – Alteração após disparo de transição t_1	21
Figura 2.7 – Transition source antes e após o disparo	22
Figura 2.8 – Transition sink antes e após o disparo	22
Figura 2.9 – Transformação de uma rede com self-loop em pura	23
Figura 2.10 - Sequencial	25
Figura 2.11 - Conflito	25
Figura 2.12 - Concorrência	25
Figura 2.13 - Sincronização	25
Figura 2.14 - Fusão	26
Figura 2.15 - Confusão	26
Figura 2.16 – Mutualmente exclusivo	26
Figura 2.17 - Prioridade	26
Figura 3.1 - Planta das Instalações de Potência do Hospital	30
Figura 3.2 - Posto de Seccionamento	30
Figura 3.3 – Posto de Transformação	31
Figura 3.4 – Esquema elétrico do trafo 1	32
Figura 3.5 – Quadros Gerais de Baixa Tensão	33
Figura 3.6 – Disjuntores interbarras do QGBT	34
Figura 3.7 – Autómato do sistema de funcionamento gestão de interbarras	34
Figura 3.8 – Esquema do autómato do sistema de gestão de interbarra	35
Figura 3.9 – Unidade de baterias de condensadores	36
Figura 3.10 – Unidade central de alimentação ininterrupta de energia eléctrica	37
Figura 3.11 – UPS de dispositivos de controlo e comando do QGBT	37
Figura 3.12 – Esquema elétrico do sistema de UPS central	38
Figura 3.13 – Grupo eletrogéneo	41
Figura 3.14 – Esquema elétrico do sistema de fornecimento da eletricidade através dos grupos	42
Figura 3.15 – Controlo da gestão técnica	42
Figura 3.16 – Blocos referentes à implementação do processo	43
Figura 3.17 – Esquema geral simplificada do sistema eléctrico	45
Figura 3.18 – Matriz de funcionamento do sistema eléctrico	46
Figura 3.19 – Esquema do autómato de gestão do sistema	47
Figura 3.20 – Representação esquemática do Sistema de Alimentação de Emergência	48

Figura 3.21 – Interface gráfica do CPN Tools.....	49
Figura 3.22 – Declaração de variáveis.....	50
Figura 3.23 – Condição inicial	51
Figura 3.24 – Primeira etapa do token.....	51
Figura 3.25 – Processo de comutação dos anéis.....	52
Figura 3.26 – Transferência de energia dos PT's para os QGBT's.....	53
Figura 3.27 – Transmissão informação de avarias dos anéis para o ATS	53
Figura 3.28 – Fornecimento de energia pelos UPS's	54
Figura 3.29 – ATS avariado	54
Figura 4.1. – Representação esquemática com redundância do ATS.....	57
Figura 4.2 – Sistema paralelo	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Definições dos elementos fundamentais da RdP	10
Tabela 2.2 – Algumas interpretações típicas de transições e lugares; adaptado de (Adaptado de [16])	13
Tabela 3.1 – Caraterísticas gerais de cada uma das UPS's	40

LISTA DE SIMBOLOGIAS E ABREVIATURAS

ATS	Automatic Transfer System
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPN	Colored Petri Nets
DEDS	Discrete Event Dynamic Systems
EDP	Energias de Portugal
EFRP	Equação Fundamental das Redes de Petri
EU	União Europeia
F	Arcos
FMEA	Failure Made and Effects Analysis
FMS	Flexible Manufacturing Sistem
HLPN	High Level Petri Net
IBM	Interbarras Motorizados
IGTB	Insulated Gate Bipolar Transistor
MC	Manutenção Corretiva
MP	Manutenção Preventiva
MT	Média Tensão
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
P	Lugar

PN	Petri Net
PS	Posto de Seccionamento
PT	Posto de Transformação
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RdP	Redes de Petri
REE	Rede Elétrica Externa
SPN	Stochastic Petri Net
T	Transição
UPS	Uninterruptible Power Supply
UTA	Unidades de Tratamento de Ar

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Pertinência do Tema

O conceito de manutenção, nas últimas décadas, tem vindo a evoluir exponencialmente e de forma muito consistente, acompanhando o desenvolvimento tecnológico, aumentando assim o seu âmbito e diversificação das suas estratégias de intervenção. Resultante das evoluções tecnológicas ocorridas nos últimos 30 anos, foram desenvolvidos inúmeros modelos[4], [5], [8] e [21], de processos de manutenção, que nos conduzem para a nova geração de manutenção, e já se fala na 5ª geração, que desempenha um papel cada vez mais relevante e imprescindível na gestão das organizações.

Segundo a norma europeia EN 13306:2010 (CEN, 2010), “A manutenção é a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão aplicadas durante o ciclo de vida de um ativo, tendo como objetivo mantê-lo ou repô-lo num estado em que pode desempenhar a função requerida”. Ainda que, na definição de manutenção apresentada pela norma não mencione os seus custos, faz-se alusão à necessidade de estarmos atentos ao *Life Cycle Cost* [17].

Os equipamentos de que usufruímos atualmente são cada vez mais complexos e altamente sofisticados, agregando conhecimentos de diferentes áreas de engenharia (mecânica, automação, eletrónica, materiais, etc.), o que torna as tarefas de manutenção mais complexas. O alto nível de sofisticação dos ativos atuais exige padrões máximos de requinte para os processos de manutenção. Assim, os gestores de manutenção devem estar cada vez mais capacitados tanto de recursos técnicos como de ferramentas apropriadas, para estruturar as ações de manutenção, de modo a ser alcançado um equilíbrio entre os benefícios esperados e as correspondentes potenciais consequências esperadas [24].

A multiplicidade de tarefas associadas à manutenção, geralmente, encontra-se diretamente relacionada com a diversidade de instalação e dos ativos a manter em condições adequadas de funcionamento [17]. Contudo, no que se refere a organização, estratégia e metodologia de funcionamento, os princípios gerais podem ser estabelecidos para qualquer organização.

Uma percentagem apreciável das atividades exercidas tanto nas empresas como nas organizações, particularmente naquelas que reúnem na sua estrutura física uma elevada variedade dos ativos técnicos e com um nível de complexidade apreciável, nomeadamente no contexto hospitalar, estão relacionadas com as atividades da manutenção, o que implica a resolução de um manancial de problemas através de métodos do tipo *run to failure* ou *reactive maintenance*, que sucedem não obstante o nível de planeamento de manutenção ser apropriado. Este tipo de problema acarreta uma análise permanente, tendo como objetivo a maximização da disponibilidade dos ativos a custos racionais, contribuindo de forma determinante para o bom desempenho de todas as operações.

O tema aqui apresentado no estudo pretende dar um contributo na abordagem à temática da análise da fiabilidade na gestão das operações do sistema de potência de uma unidade hospitalar de padrão europeu, recorrendo a Redes de Petri como ferramenta de trabalho.

A origem do nome Rede de Petri deve-se ao trabalho realizado por Carl Adam Petri, sendo que a teoria inicial sobre o tema foi apresentada pela primeira vez no âmbito da sua tese de doutoramento, submetida em 1962, intitulada *Kommunikation mit Automaten*, e apresentada à Faculdade de Matemática e Física da Universidade Técnica de Darmstadt na Alemanha. Apresentou um tipo de grafo bipartido¹ com estados associados, com o objetivo de estudar a comunicação entre as máquinas de estado [16].

As RdP são uma ferramenta de modelação, análise formal e simulação de sistemas de eventos discretos, que permitem obter a representação gráfica (possibilitando uma visualização simultânea da sua estrutura e comportamento) de sistemas dinâmicos e complexos, alicerçada numa forte base matemática. Especificamente, pode dizer-se que as RdP modelam dois aspetos desses sistemas, eventos e condições bem como as relações entre eles. Em conformidade com esta caracterização, em cada estado do sistema verificam-se determinadas condições [1]. Estas podem possibilitar a ocorrência de eventos que por sua vez podem proporcionar a mudança de estado no sistema [14].

Esta ferramenta tem vindo a ser largamente disseminada através de publicações de resultados de investigações de múltiplos autores, bem como da demonstração da abrangência e da sua aplicabilidade em áreas díspares devido às suas numerosas potencialidades de modelação, designadamente: nas redes de comunicação, sistemas de produção, de automação, de diagnósticos de falhas, logística, partilha de recursos e, de forma geral, em todos os sistemas de eventos discretos.

Atendendo ao papel de extrema relevância que o grupo eletrogéneo desempenha na garantia do funcionamento eficiente de qualquer unidade hospitalar, e devido ao nível de exigência imposta atualmente relativamente à manutenção, é impreterível a implementação de sistemas de gestão da manutenção munidos de metodologias, as quais visam estabelecer a sequenciação do risco das falhas e o aumento da fiabilidade.

1.2 Definição dos objetivos

O objetivo fundamental desta dissertação prende-se com o aproveitamento e transposição do potencial proporcionado pelas Redes de Petri para a gestão e análise de fiabilidade de funcionamento do grupo eletrogéneo e do grupo de emergência elétrica de uma unidade hospitalar de padrões europeus.

Face ao referido, esta dissertação tem como principal propósito contribuir, de forma válida, na transposição do potencial de Redes de Petri para o mundo da gestão de manutenção, enriquecendo-o com mais uma ferramenta que no futuro poderá vir a revelar-se como sendo uma ferramenta de grande relevância e eficiência na gestão da manutenção em geral.

¹ Um grafo G denomina-se bipartido quando os seus nós podem ser divididos em dois conjuntos U e V , tais que nenhum nó em U ou V se encontra ligado a outro nó contido no mesmo conjunto.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se estruturado em 6 fases distintas: Introdução, Corpo Teórico, Estudo do Caso e Conclusão.

Capítulo 1 – A Introdução é dedicada ao enquadramento e pertinência do tema, à definição dos objetivos propostos, e apresenta a organização e estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – O Corpo Teórico consiste na revisão do estado da arte, focando no tema Redes de Petri. Nessa revisão teórica procura sintetizar e discutir alguns conceitos relevantes de Redes de Petri, desde conceitos mais genéricos – Redes de Petri ordinárias – aos mais específicos, tais como Redes de Alto Nível, Redes Hierárquicas e Redes Temporizadas.

Capítulo 3 – No Estudo de Caso incidiu-se na caracterização do edifício, caracterização do grupo eletrogéneo, apresentação da Redes de Petri com estrutura de modelação de *tokens*, que é a principal ferramenta na qual se baseia a proposta de modelação, descrição do funcionamento do sistema e simulação computacional.

Capítulo 4 – Na Solução Proposta, será apresentado o plano de ação recomendado para atenuar o risco do sector considerado mais crítico do sistema.

Capítulo 5 – Por fim, na Conclusão e Trabalhos Futuros, serão apresentados os contributos resultantes do projeto, as limitações, bem como recomendações de melhorias futuras.

Para além dos capítulos mencionados, o trabalho incorpora a *Bibliografia Consultada*.

CAPÍTULO 2. REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

2.1 Processo de manutenção

A classificação dos processos de manutenção descritos nesta seção segue [23], [17] e [24]. A manutenção inclui a combinação de todas as ações técnicas e administrativas destinadas a manter um sistema ou restaurá-lo para o estado em que ele pode executar pelo menos parte da sua ação pretendida [7].

Habitualmente os diferentes critérios adotados para intervir na manutenção, são designados por “tipos de manutenção”. A classificação usada por diferentes autores nem sempre é coincidente. Sendo que, a manutenção pode ser classificada de acordo com o seu tipo e o seu grau, neste trabalho, relativamente à classificação adotada, é baseada nas normas EN 13306:2010 (CEN, 2010).

Os “tipos de manutenção” podem ser classificados em duas categorias principais:

- Manutenção corretiva (MC);
- Manutenção preventiva (MP).

Manutenção corretiva são todas as ações de manutenção realizadas após um sistema ter falhado, com o objetivo de restaurar a sua funcionalidade. No caso em que a intervenção corretiva é definitiva, diz-se “curativa”, no entanto, pode também ser designado de “paliativa” se a intervenção tiver caráter provisório.

Manutenção preventiva refere-se às ações de manutenção previamente planeada segundo um programa, executada enquanto o sistema se encontra operacional, com o objetivo de reduzir a probabilidade de avarias, mantendo assim o sistema num horizonte de tempo operacional desejado, evitando ou retardando falhas.

A manutenção baseada em condição é um tipo de MP em que as ações estão subordinadas a uma ocorrência predeterminada reveladora do estado de “saúde” do sistema, ou seja, aciona a ação de manutenção quando o estado de uma condição ou estado do sistema atinge um limite que reflete alguma degradação e/ou perda de desempenho, embora ainda não haja falha.

De acordo com o grau de manutenção, a classificação pode ser um dos cinco seguintes tipos:

Manutenção completa ou arranjo perfeito – são as ações que restabelecem a condição de operação do sistema para um estado “tão bom quanto novo”. Usualmente a substituição de um sistema defeituoso por um novo é um arranjo perfeito;

- Arranjo mínimo são ações ínfimas de manutenção que recuperam o sistema para a mesma taxa de falha que tinha quando já se encontrava na iminência de falhar;
- Arranjo incompleto são ações de manutenção que fazem um sistema ficar num estado muito melhor do que se encontrava anteriormente, mas não “tão bom como novo”;

- Reparações anómalas são ações que involuntariamente aumentam a taxa de falha do sistema, mas não levam o sistema ao estado de avaria; e
- Os piores arranjos são ações que involuntariamente fazem com que o sistema entre sistematicamente em estado de avaria.

A política de manutenção pode estipular ações de manutenção diferentes dependendo dos estados de múltiplos componentes. Por exemplo, a falha de alguns componentes pode desencadear ações de manutenção noutros componentes.

Por norma, as políticas de manutenção são elementos que compõem um conjunto de regras que traçam os tipos de ações de manutenção que são consideradas relevantes em resposta aos tipos de ocorrências. Devido ao papel de enorme pertinência que a manutenção preventiva desempenha, as políticas de manutenção preventiva são talvez uma das políticas de manutenção mais estudadas na literatura [24].

Em suma, a manutenção não só melhora a eficiência de custo de operação dos sistemas, mas também contribui para reduzir significativamente a probabilidade de falha devastadora do sistema. Os responsáveis pela gestão da manutenção devem planear as ações de manutenção, de modo que seja alcançado um equilíbrio entre os benefícios esperados e consoante as potenciais consequências esperadas [24].

2.2 Sistemas Dinâmicos de Eventos Discretos (SDED)

Numa definição informal, pode afirmar-se que sistema é um conjunto de recursos que atuam ou são utilizados de forma coordenada para executar uma determinada tarefa. Na perspetiva das aplicações industriais, estes recursos podem ser máquinas e matérias-primas. Portanto, tomando como exemplo um sistema de fabrico de uma indústria, é um conjunto de máquinas e matérias primas (os recursos) que são utilizados de forma coordenada e controlada para produzir um bem.

Os sistemas podem ser divididos em dois tipos: sistemas discretos e sistemas contínuos [20]. Por lidarem com variáveis contínuas de processos, os sistemas representam grandezas físicas que não variam bruscamente, ou que não possuem descontinuidade. Quando as variáveis de processo variam bruscamente num curto espaço de tempo, de forma praticamente instantânea, estamos na presença de sistemas discretos. É de realçar que os sistemas contínuos podem ser transformados em discretos.

A tecnologia moderna criou cada vez mais sistemas dinâmicos que não são facilmente descritos por equações diferenciais comuns ou parciais. Exemplos desses sistemas são, entre outros, sistemas de fabrico, redes de comunicação, sistemas de tráfego e logística, sistemas militares de comando e controlo e outras entidades operacionais cruciais para a civilização moderna. A evolução dos sistemas no tempo depende das interações complexas do tempo de vários eventos discretos, como a chegada ou a partida de um trabalho, a conclusão de uma tarefa ou mensagem. O estado de tais sistemas dinâmicos muda apenas nestes instantes de tempo discretos em vez de continuamente. Chamamos a esses sistemas de *discrete event dynamic systems* (DEDS's),

em oposição aos *continuous variable dynamic systems* mais familiares no mundo físico, que são descritos por equações diferenciais [11].

Embora existam muitos tipos diferentes de DEDS's, eles compartilham algumas características comuns, que incluem [25]:

- I. *Event-driven* – Um DEDS pode ser visto como uma sequência de eventos. A conclusão de uma atividade pode iniciar uma ou mais atividades novas. Além disso, a ordem de ocorrência de eventos não é necessariamente única.
- II. *Concurrent* – Muitas atividades podem ocorrer simultaneamente. Por exemplo, num *Flexible Manufacturing System* (FMS), várias estações de trabalho podem processar peças ao mesmo tempo.
- III. *Asynchronous* – A evolução dos eventos do sistema é não periódica. Isso pode ser devido a rotinas de processamento variável e tempos de processamento.
- IV. *Deadlock* – Quando o DEDS atinge um determinado estado, a evolução do sistema pára. Um sistema bem projetado deve ser capaz de detetar e resolver o estado de bloqueio.
- V. *Conflict* – Isto pode acontecer quando dois ou mais processos exigem um recurso comum ao mesmo tempo. Por exemplo, num sistema cliente-servidor, dois ou mais clientes exigem um servidor específico.

Para a representação de DEDS's recorre-se à máquina de estados finitos, onde a representação clássica de um sistema a eventos discretos, cujo número de estados é finito, consiste em enumerar todos os estados possíveis e em descrever os eventos do tipo mudanças de estado, isto é, descrever o próximo estado a partir de cada estado.

Deve salientar-se que o propósito primário de uma caracterização clara de um sistema a eventos discretos é explanar as interações entre os estados do processo e o sistema de tomada de decisão que irá controlá-lo. Outro ponto relevante é que a introdução de alterações, mesmo sendo pequenas, obriga a que seja necessário construir uma nova máquina de estados [2].

2.3 Redes de Petri

Diferentes profissionais deparam-se constantemente com inúmeras dificuldades ao planear determinadas tarefas, simplesmente porque encontram dificuldade em visualizar o processo como um todo. Devido a esta dificuldade, acabam por cometer erros de planeamento e o sistema ou o processo não funciona como seria expectável. A utilização de modelos ajuda a resolver o problema, uma vez que, construir um modelo exige o estudo aprofundado do processo a ser modelado e, por outro lado, porque um modelo gráfico ou matemático possibilita não só a representação das etapas do processo, assim como analisar e verificar propriedades importantes.

Existem diversas técnicas de modelação de sistemas discretos, entre elas, as técnicas baseadas em lógica e as técnicas baseadas em redes [25]. As Redes de Petri (RdP) consistem numa técnica

de modelação baseada em redes que utiliza um mecanismo de transferência de *token* em fluxo, controlado por condições que habilitam os eventos.

A origem e o nome de Redes de Petri devem-se ao trabalho de Carl Adam Petri, no âmbito da sua tese de doutoramento, submetida em 1962, intitulada *Kommunikation mit Automaten* (Comunicação com Autómatos), e apresentada à Faculdade de Matemática e Física da Universidade Técnica de Darmstadt na Alemanha. Petri apresentou um tipo de grafo bipartido com estados associados, com o objetivo de estudar a comunicação entre autómatos [16].

As Redes de Petri são uma ferramenta de modelação, análise formal e simulação de sistemas a eventos discretos, que permite obter a representação gráfica (possibilitando uma visualização simultânea da sua estrutura e comportamentos) de sistemas dinâmicos e complexos, alicerçada numa forte base matemática. Desde a sua criação, RdP e, em particular, as suas generalizações de *Stochastic Petri Nets (SPN)*, têm sido amplamente utilizadas para modelar processos baseados em eventos discretos, e também têm vindo a ser largamente disseminadas através de publicações de resultados de investigações de múltiplos autores, bem como através da demonstração da abrangência e da sua aplicabilidade em áreas díspares, devido às suas numerosas potencialidades de modelação, designadamente: nas redes de comunicação, sistemas de produção, de automação, de diagnósticos de falhas, logística, partilha de recursos e, de forma geral, em todos os sistemas de eventos discretos [14].

As aplicações de RdP aumentaram consideravelmente na década de oitenta, com o surgimento das chamadas *High-level Petri Nets (HLPN)*, como por exemplo, *Timed Petri Net* as *Numerical* [15], *Predicate/Transition* [16] e as *Coloured* [19]. Posteriormente, em meados da década de oitenta, surgiram também extensões de *SPN*. Estas inovações vieram acrescentar uma imensa robustez descritiva ao processo de modelação, pelo uso de marcas com identidade e, consequentemente, do uso de conjuntos de marcas na representação dinâmica dos sistemas modelados, bem como pela possibilidade de se associar taxas de ocorrência não determinísticas aos eventos dos sistemas modelados [14]. Embora várias obras literárias descrevam extensivamente o formalismo, nas seções seguintes é dada uma breve revisão, construída com base na adaptação de diversos autores, como por exemplo: Marranghello [14], Wang [25] e Zurawski & Zhou [28].

Contrariamente aos sistemas de transição, onde o destaque está nos estados, e aos métodos algébricos, onde o destaque está nas ações, as RdP dão igual destaque aos dois componentes.

Desta forma, pode afirmar-se que a RdP oferece uma notação gráfica para processos orientados a eventos que incluem escolha, iteração e execução simultânea, que são identificadas como um tipo particular de grafo bipartido, dirigido, composto por três elementos básicos que formam a sua estrutura tipológica.

Uma RdP consiste em ativos denominados de *transição*, passivos denominados de *lugar* e, por último, os *arcos* dirigidos. Matematicamente, uma RdP é um gráfico direcionado bipartido com um conjunto de *nós*, que são os *lugares* e, o outro conjunto de *nós*, que são as *transições*. Graficamente, os *lugares* são representados por círculos ou elipses vazias, as *transições* são retratadas por barras ou retângulos preenchidos e os *arcos* são representados por setas. A Figura

2.3 mostra uma RdP na forma mais básica com todos os seus elementos devidamente identificados.

As representações dos elementos fundamentais de uma RdP estão definidas na Tabela 2.1. Os elementos possuem representações gráficas e funções bem definidas. *Lugar* e *token* podem ter interpretações variadas ou descrever entidades abstratas [26].

2.4 Semântica de Execução de Redes de Petri

As RdP podem ser demonstradas através de três fundamentações diferentes. A primeira utiliza a teoria de *bag*² como suporte. A segunda usa os conceitos da álgebra matricial. A última é fundamenta através de uma estrutura definida por relações [9].

2.4.1 Notação gráfica utilizada na modelação de Redes de Petri

A representação gráfica regularmente utilizada para a representação dos elementos de uma RdP básica é formada por três componentes:

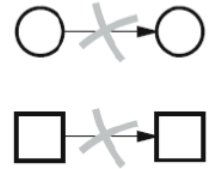
- (a) *Lugar* (P) – modeliza alguma condição do sistema em estudo. Um *lugar* p só modela um componente passivo: p pode armazenar, acumular ou mostrar as ações [20]. Um *lugar* corresponde às variáveis de *Estado* formando um conjunto $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$.
- (b) *Transição* (T) – modeliza atividades que são executadas no sistema. Uma *transição* t só modela um componente ativo: t pode produzir ações, consumir, transportar ou alterá-las [20]. Uma *transição* corresponde às *Ações* realizadas pelo sistema, ou seja, os eventos que levam o sistema de um *lugar* a outro, formando um conjunto: $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$. Uma *transição* pode possuir diferentes quantidades de *arcos* de entrada e de saída, isto é, ligações com lugares de entrada (podendo ser um ou vários) e lugares de saída (um ou vários).

É de notar que, em redes estocásticas, as ações podem ser representadas tanto por *barras* quanto por *retângulos*, para diferenciar ações com disparo imediato e ações de disparo temporizado.

- (c) *Arcos* (F) - os *arcos* dirigidos ligam os *lugares* às *transições* e estas aos *lugares*. Um *arco* nunca modela um componente de sistema, mas sim, uma relação abstrata, às vezes só existe relação teórica entre componentes, tais como, conexões lógicas, direitos de acesso, proximidades especiais ou ligações imediatas [20]. Esta relação de fluxo é representada pelo conjunto: $F = \{(x, y) \in P \times T \cup T \times P\}$.






² *Bag* é uma generalização do conceito de conjunto que admite a repetição de elementos. Na notação de *bags* utiliza-se [], enquanto que para denotar conjuntos utiliza-se { } [13].

Um *arco* nunca conecta dois lugares ou duas *transições*, pois um *arco* funciona a partir de um *lugar* para uma *transição*, ou vice-versa. Isto não é coincidência nem arbitrário, mas para modelar sistemas corretamente é inevitável que seja aplicado na construção das redes, isto é, se os componentes ativos e passivos estiverem devidamente separados [20].



Nesse caso, a rede base é representada pela estrutura topológica estática dada por $R = (P, T, F)$, que define um grafo bipartido.

Tabela 2.1 – Definições dos elementos fundamentais da RdP

Elementos	Simbologia Gráfica	Descrição	O que representa
Lugar (P)		Interpretado como uma condição; um estado; uma espera; um procedimento; uma disponibilidade de recurso partilhado ou <i>stock</i> ; um canal de comunicação.	Estado, <i>stock</i> , espera, posição geográfica ou recurso.
Transição (T)	 ou 	Associada a um evento que ocorre no sistema; a execução de uma instrução; a transmissão de uma mensagem; agentes que fazem a rede evoluir de estado para estado.	Evento, ação ou tarefa.
Arco (F)		Estabelecem as conexões entre P e T. <i>Arcos</i> podem conectar um P a uma T ou vice-versa, mas nunca dois P ou duas T.	Fluxo de informação, fluxo de recursos.
<i>Token</i>		Indica a presença de uma condição ou de um objeto num determinado lugar.	Recurso, objeto, peça, ferramenta.

Habitualmente designa-se os conjuntos de *lugares*, *transições* e *arcos* por P, T e F respetivamente e, considera-se os arcos como pares, ou seja, F como uma relação dos conjuntos de arcos de entrada das transições com conjuntos de arcos de saída das transições [20].

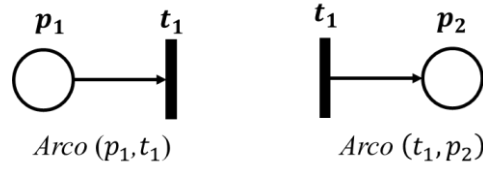


Figura 2.1 – Representação dos arcos

Segundo Wang [25], um *arco* dirigido de um *lugar* p_j para uma *transição* t_i , define p_j como um *lugar* de entrada t_i , denotado por $I(t_i, p_j) = 1$. E, um *arco* dirigido de uma *transição* t_i para um *lugar* p_j , define p_j como um *lugar* de saída de t_i , denotado por $O(t_i, p_j) = 1$. Se $I(t_i, p_j) = k$ ou $O(t_i, p_j) = k$, então existem k *arcos* dirigidos (paralelos) interligando o *lugar* p_j para fazer a transição de t_i (ou interligando a *transição* t_i para o *lugar* p_j). Normalmente, na representação gráfica, os *arcos* paralelos que interligam um *lugar*–*transição* e uma *transição*–*lugar*, são representados por um único *arco* dirigido identificado com peso k .

Em suma, os lugares surgem como representantes do estado da rede e as transições como responsáveis pela mudança de estado. Desta forma, RdP é simultaneamente orientada para os estados e para as ações [1].

2.4.2 Definição formal de Redes de Petri

Matematicamente uma RdP é definida como sendo um tuplo, em que cada elemento representa um componente da estrutura da RdP [18] e [14]. Usando este conceito, uma rede elementar de Petri é formalmente definida pelo quádruplo $R = (P, T, F, W)$, onde se verifica:

- (a) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – Conjunto de todos os n lugares;
- (b) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – Conjunto de todas as m transições;
- (c) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – Define um conjunto de q arcos;
- (d) $W: F \rightarrow N$ – Conjunto das r marcações possíveis, incluindo a marcação inicial.
O N indica um conjunto de números naturais.

A estrutura topológica de uma RdP pode, pois, ser definida também como um quádruplo [16], embora existam autores que definem uma RdP como uma tripla [14].

De acordo com Murata [16], a definição formal de uma RdP quando definida como um quádruplo, segundo o ponto de vista da teoria de *bags* é o seguinte:

$$N = (P, T, I, O, M_0) \quad (2.1)$$

Onde:

- (a) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – É um conjunto finito e não-vazio de lugares;

- (b) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – É um conjunto finito e não-vazio de transição com $P \cup T \neq \emptyset$ e $P \cap T = \emptyset$ (os conjuntos P e T são disjuntos);
- (c) $I: (P \times T) \rightarrow N$ – É uma função de entrada que define os arcos dirigidos de lugares para transições, onde N é um conjunto inteiro não negativo, ou seja, um conjunto de arcos dirigidos de P para T , onde $I = \{(p_i, t_j)\}$;
- (d) $O: (T \times P) \rightarrow N$ – É uma função de saída que define os arcos dirigidos de transição para lugares, ou seja, um conjunto de arcos dirigidos T para P , onde $O = \{(t_j, p_i)\}$; e
- (e) $M_0: P \rightarrow N$ – É a marcação inicial, com $P \cup T \neq \emptyset$ e $P \cap T = \emptyset$. Representa o conjunto das capacidades associadas a cada lugar ou o vetor das capacidades dos lugares $M_0 = [M_1, M_2, \dots, M_m]^T$, podendo assumir um valor finito.

Na Figura 2.2 temos um exemplo de uma RdP, definida como:

$$N = (P, T, I, O, M_0) \quad (2.2)$$

Onde:

- $P = \{p_1, p_2, p_3\}$
- $T = \{t\}$
- $I = \{(p_1, t), (p_2, t), (t, p_3)\}$
- $O = \{(p_1, t) \rightarrow 1, (p_2, t) \rightarrow 2, (t, p_3) \rightarrow 2\}$
- $M_0 = \{p_1 \rightarrow 3, p_2 \rightarrow 7, p_3 \rightarrow 0\}$

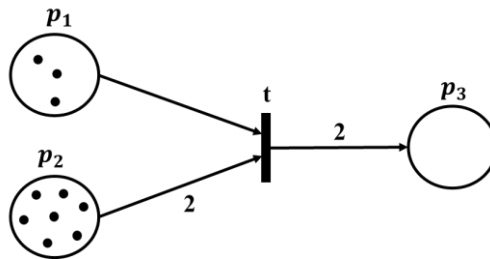


Figura 2.2 – Exemplo de RdP definida como um quintuplo

Quando nenhum lugar contém mais de um *token*, as marcações são, na verdade, conjuntos em que geralmente usamos a seguinte notação para os representar: $M_0 = \{p_4, p_5, p_6\}$

Uma estrutura de RdP, $PN = (P, T, F, W)$ sem qualquer marcação inicial específica é denotada por N . E uma RdP com marcação inicial é denotada por (N, M_0) .

Algumas interpretações típicas de transições e seus lugares de entrada e lugares de saída são exibidas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Algumas interpretações típicas de transições e lugares; adaptado de (Adaptado de [16])

Lugares de entrada	Transições	Lugares de saída
<i>Preconditions</i>	<i>Event</i>	<i>Post conditions</i>
<i>Input data</i>	<i>Computation step</i>	<i>Output data</i>
<i>Input signals</i>	<i>Signal processor</i>	<i>Output signals</i>
<i>Resource needed</i>	<i>Task or job</i>	<i>Resources release</i>
<i>Conditions</i>	<i>Clause in logic</i>	<i>Conclusion(s)</i>
<i>Buffers</i>	<i>Processor</i>	<i>Buffers</i>

2.4.3 Redes de Petri marcadas

O *token* é um conceito primário em RdP, tanto quanto *lugar* e *transição*. Podem ser utilizados para representar entidades abstratas, como condições ou estados, mas também entidades físicas, como peças, objetos ou depósitos. A circulação dos *tokens* através da rede é que nos vai dar a noção da representação do dinamismo das ocorrências, ou seja, os *tokens* são informações atribuídas aos *lugares*, para representar o estado da rede num determinado momento. Assim, para simular o comportamento dinâmico dos sistemas, a marcação da RdP é modificada a cada ação realizada (transição disparada) [9]. Nesta seção exponho a definição formal de marcação, bem como a definição de uma RdP marcada.

Definição de Marcação - seja P o conjunto de lugares de uma rede R . Define-se formalmente marcação como uma função que mapeia o conjunto de lugares P a inteiros não-negativos [13].

$$M_0: P \rightarrow \mathbb{N} \quad (2.3)$$

Uma outra definição da marcação das RdP pode ser apresentada na forma vetorial.

Definição do Vetor Marcação: seja P o conjunto de lugares de uma R . A marcação pode ser definida como um vetor [13].

$$M = (M_{(p_1)}, \dots, M_{(p_n)}), \text{ onde } n = \#P, \text{ para todo } p_i \in P: M_{(p_i)} \in \mathbb{N} \quad (2.4)$$

Cabe destacar, que o conjunto e a distribuição de *tokens* numa rede é a marcação desta rede e esta representa o estado do modelo.

Graficamente, os P numa RdP podem conter um número diferenciado de *tokens*. Qualquer distribuição de *tokens* para os P representará uma configuração da rede chamada marcação. A Figura 2.3 ilustra uma rede marcada R_1 , onde existe um *token* no p_2 e um no p_3 e, cujo vetor marcação inicial é representado pelo vetor M_0^R .

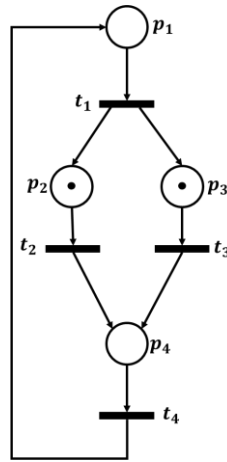


Figura 2.3 – Rede marcada R_1

$$M_0^R \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{matrix}$$

$M_{(pi)}$ é o número de *tokens* contidas no lugar p na marcação M . A marcação M_0 é a distribuição dos *tokens* nos lugares, sendo representada por um vetor coluna cuja dimensão é o número de lugares e elementos $M_{(p)}$.

Esta rede elementar pode ser usada para representar vários aspetos dos sistemas modelados. Para estudar o comportamento dinâmico do sistema modelado, em termos dos seus estados e das suas alterações, cada P encontra-se capacitado de poder conter nenhum ou qualquer número positivo de *tokens*, representado por pequenos pontos sólidos. A presença ou a inexistência de *token* num *lugar* pode indicar se uma condição associada a esse *lugar* é verdadeira ou falsa, por exemplo [25].

Uma RdP marcada formalmente pode ser definida por uma dupla formada pela estrutura de R e uma marcação inicial M_0 associada à rede.

Definição da Rede Marcada: define-se como RdP marcada pela dupla

$$RM = (R, M_0) \quad (2.5)$$

Onde:

- R é a estrutura da RdP;

- M_0 é a marcação inicial dada pela aplicação.

O comportamento dos sistemas pode ser descrito em função dos seus estados e das suas alterações. Para simular o comportamento dinâmico dos sistemas, a marcação da RdP é modificada, a cada ação de transição disparada, em conformidade com as regras de execução.

2.4.4 Pré e Pós-condições dos elementos

Conforme já referido, uma RdP pode ser definida como uma quintupla $PN = (P, T, I, O, M_0)$, em que se designa os conjuntos de *lugares*, *transições* e *arcos* como P , T e I respetivamente, e considera-se arcos como pares, ou seja, I como uma relação dos conjuntos de *arcos* de entrada das transições com conjuntos de *arcos* de saída das transições [20].

- Um *arco* entre um *lugar* e uma ação indica que essa condição é necessária para a executar (pré-condição);
- Um *arco* entre uma ação e um *lugar* indica que a sua execução irá tornar essa condição verdadeira (pós-condição).

I. Então, dada uma rede $N = (P, T, I, O, M_0)$ e um elemento $x \in P \cup T$

(a) O conjunto dos seus elementos de entrada define-se como:

$\cdot x = \{y \in P \cup T \mid (y, x) \in F\}$ é o conjunto de pré-condição

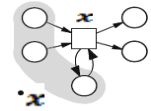
(b) O conjunto dos seus elementos de saída define-se como:

$x^* = \{y \in P \cup T \mid (x, y) \in F\}$ é o conjunto de pós-condição do x

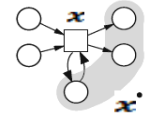
II. E dois elementos $x, y \in P \cup T$ formam um *loop* se

$x \in \cdot y$ e $y \in x^*$

III. Se a é uma ação, $\cdot a$ denota as suas pré-condições e a^* as suas pós-condições.



Pré-condições



Pós-condições

Segundo Cardoso & Valette [2], uma RdP pode ser associada a um grafo constituído por dois tipos de nós, onde teremos os nós lugares e os nós transições. Atendendo às condições acima descritas, um arco liga um lugar p a uma transição t se e somente se $Pre(p, t) \neq 0$ e, um arco liga uma transição t a um lugar p se e somente se $Pós(p, t) \neq 0$.

A partir dos elementos $a_{ij} = Pre(p_i, t_j)$, que indicam o peso do arco ligando o lugar de entrada p_i à transição t_j , define-se a matriz de incidência anterior Pre de dimensão $n \times m$: o número de linhas é igual ao número de lugares e o número de colunas é igual ao número de transições. Da mesma forma, a matriz de incidência posterior $Pós$ de dimensão $n \times m$ é definida a partir dos elementos $b_{ij} = Pós(p_i, t_j)$.

Os valores não nulos das matrizes Pre e $Post$ são associados aos arcos do grafo como etiquetas. Se o valor é unitário, não é necessário etiquetar o arco correspondente no grafo. Da mesma forma, se nada é indicado no grafo, o valor correspondente na matriz é unitário.

Para melhor entendimento de como funciona cada um dos elementos representados na Tabela 2.2 e as definições descritas nesta e nas anteriores seções, segue-se um exemplo.

A rede, é constituída por quatro *lugares*, quatro *transições* e nove *arcos* que ligam os *lugares* de entrada às *transições* e estes aos *lugares* de saída.

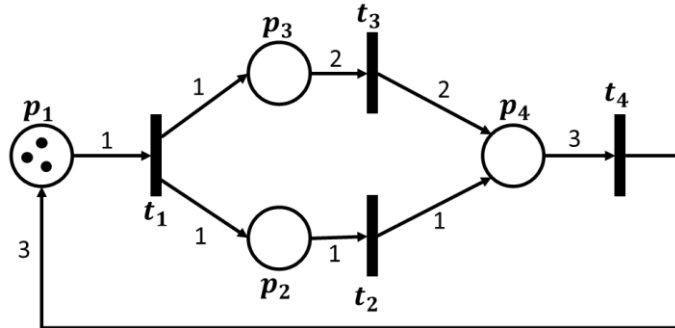


Figura 2.4 – Exemplo de RdP

Repare que um *arco* pode ter pesos diferentes, os quais são indicados por um número inteiro que representa a quantidade de *tokens* que serão removidos ou acrescentados a um determinado *lugar*. Como se pode constatar, no exemplo da Figura 2.4, existem três *arcos* que saem do *lugar* p_4 e chegam à *transição* t_4 . Para facilitar o desenho, apenas um *arco* de peso três foi desenhado.

Os *tokens* dentro do *lugar* p_1 representam as quantidades de recursos existentes ou disponíveis e, essa quantidade também pode ser representada por um número inteiro. Se não existir *token* dentro dos *lugares*, significa que esses *lugares* se encontram vazios.

A atividade correspondente a p_4 requer três recursos de cada vez, visto que, necessita de recursos de p_2 e p_3 para concretizar a tarefa.

Considerando que a RdP é definida por um quártuplo $R = (P, T, Pre, Pos, K)$, em que:

- Vetor coluna dos lugares: $P = [p_1, p_2, p_3, p_4]^T$
- Vetor coluna das transições: $T = [t_1, t_2, t_3, t_4]^T$
- O peso do arco (p_1, t_1) vale 1, ou $Pre(p_1, t_1) = 1$
- O peso do arco (p_2, t_2) vale 1, ou $Pre(p_2, t_2) = 1$
- O peso do arco (p_3, t_3) vale 2, ou $Pre(p_3, t_3) = 2$
- Enquanto que a atividade correspondente a p_1 necessita apenas de um recurso de cada vez, o peso do arco $Pre(p_4, t_4) = 3$.
- Vetor das capacidades dos lugares: $K = [k_1, k_2, \dots, k_n]^T$. Para efeito de simplificação, vamos considerar que todos os lugares possuem capacidade ilimitada. Assim sendo, ignoramos K e redefinimos $R = (P, T, Pre, Pos)$.

³ O índice sobrescrito T indica a operação transposta aplicada à matriz.

Seguindo esta definição matricial, a RdP da Figura 2.4 pode ser representada pelas seguintes matrizes:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{bmatrix}$$

$$Pre = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \end{matrix}$$

$$Pós = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \end{matrix}$$

Repare-se que, as dimensões da matriz *Pre* e da matriz *Pós* são determinadas pela quantidade de transições (colunas) e pela quantidade de lugares (linhas). Ao exibir um número diferente de zero na matriz *Pre* ou na matriz *Pós* significa que existe um arco que liga p_i a t_j ou t_j a p_i respetivamente. O valor em $Pre(p_i, p_j)$ ou $Pós(p_i, p_j)$ é determinado pelo peso daquele arco.

A condição inicial para que o processo possa ser executado pelo menos uma vez é definida pela quantidade inicial de *tokens* em determinados *lugares*. Esta condição inicial é chamada de Marcação Inicial (M_0). Sempre que um *token* é removido ou adicionado a um *lugar*, diz-se que atingiu uma nova Marcação (M).

2.4.5 Matriz de Incidência

Segundo Maciel [13], utilizando-se a representação matricial, a estrutura das RdP é representada pelo conjunto de lugares, conjunto de transições, matriz de entrada e matriz de saída. Essas matrizes expressam as interconexões entre lugares e transições dos modelos, dado que a matriz de entrada apresenta os lugares de entrada (pré-condições) e a matriz de saída os lugares de saída (pós-condições) das transições, assim como a valorização destas interconexões (arcos). Quando uma transição t dispara, a diferença entre as marcações M_1 e M_0 é igual à diferença dada por $I(p, t) - O(p, t)$, para todo o lugar $p \in P$.

Designa-se $C = O - I$ a matriz de incidência, dado que esta fornece a incidência de arcos de entrada e saída em cada transição dos modelos. Esta matriz representa a estrutura dos sistemas modelados.

Definição de matriz de incidência: seja uma rede $R = (P, T, I, O, K)$ onde P é o conjunto de lugares, T o conjunto de transições, I a matriz de entrada, O a matriz de saída e K a capacidade dos lugares. A matriz de incidência C das RdP representa a relação $P \times T \rightarrow Z$ definida por:

$$\forall t \in T \mid C(p, t) = O(p, t) - I(p, t) \quad (2.6)$$

Embora a estrutura da rede seja representada pelas matrizes de entrada e saída e, consequentemente, pela matriz de incidência, em alguns casos, a matriz de incidência não possibilita a representação desta estrutura completamente.

2.4.6 Execução do disparo das transições

De acordo com Zhou e Zurawski [26], o poder de destruir e criar novas marcas contidas nos *lugares* da RdP é da responsabilidade das *transições*. Os *arcos*, que se encontram ligados às *transições*, têm o papel de indicar sobre que *lugares* exatos atuam. Um *arco* de entrada indica que essa *transição* retira, aquando do seu disparo, um *token* desse *lugar*. À semelhança do papel desempenhado pelo *arco* de entrada, o *arco* designado de saída indica que essa *transição* adiciona, aquando do seu disparo, um *token* a esse *lugar*. Nesta medida, podemos considerar os *arcos* como indicadores de movimento dos *tokens* de um *lugar* para outro, atravessando a *transição* de forma automática e instantânea.

Dado que, a execução de uma RdP é controlada pelo número e distribuição de *tokens* na RdP, ao alterar a distribuição de *tokens* em lugares (o que pode refletir a ocorrência de eventos ou a execução de operações) por exemplo, pode-se estudar o comportamento dinâmico do sistema modelado. Uma RdP é executada ao disparar transições [25].

Dada uma marcação, a semântica de execução da RdP rege-se pelas seguintes regras:

- (1) Regra de habilitação: Quando existem *tokens* suficientes em cada um dos lugares de entrada de uma transição, esta transição é ativada e pode disparar, ou seja, uma transição só pode disparar se se encontrar habilitada. Uma transição t é dita habilitada se cada lugar de entrada p de t possuir pelo menos o número de *tokens* igual ou superior ao peso do arco dirigido que liga p a t , de maneira a poder ser retirada no disparo da transição, pelo respetivo arco, i. e.,

$$\forall p \in P, M(p) \geq I(p, t) \quad (2.7)$$

A equação 2.7 pode ser escrita na forma:

$$M \geq I(., t) \quad (2.8)$$

Onde o vetor coluna $I(., t)$ é a coluna da matriz I referente à transição t e M o vetor marcação inicial.

Ainda se pode recorrer a outras notações para exprimir que t está habilitada para uma dada marcação M :

$$\forall p \in {}^\bullet t, M(p) \geq I(p, t) \quad (2.9)$$

A equação 2.9 pode ser denotada por:

$$M[t] \quad (2.10)$$

$$M \xrightarrow{t} \quad (2.11)$$

Assim, quando existir um disparo da transição, ela absorve os *tokens* de entrada necessários e cria *tokens* nos seus lugares de saída. Essas duas ações referidas são executadas num único passo não interrompível, isto é, o disparo de transição ocorre de forma automática e instantânea levando a que não exista nenhum instante no qual todos, ou parte, dos lugares de entrada já contenham menos uma marca e todos, ou parte, dos lugares de saída não contenham mais uma marca.

Vale a pena salientar que a marcação habilita o disparo de uma transição, contudo não obriga o seu disparo (não-determinismo).

(2) Regra de disparo:

(a) Uma transição t habilitada pode ou não disparar, dependendo da interpretação adicional, e

(b) Um disparo de uma transição t remove de cada lugar de entrada p_i o número de *tokens* igual ao peso do arco direcional que liga p_i a t . São criados novos *tokens* em cada lugar de saída p_i , sendo o número de *tokens* igual ou superior ao peso do arco direcional que conecta t a p_i . Matematicamente, ao disparar t em M produz-se uma nova marcação M' , tal que:

$$\forall p \in P, M'(p) = M(p) - I(p, t) + O(p, t) \quad (2.12)$$

A nova marcação M' é dada pela equação:

$$M' = M - I(p, t) + O(p, t) = M + C(p, t) \quad (2.13)$$

As seguintes notações são utilizadas para representar a marcação obtida com o disparo de t :

$$M[t]M' \quad (2.14)$$

$$M \xrightarrow{t} M' \quad (2.15)$$

A notação utilizada para expressar a marcação M'' a partir de M' pelo disparo da transição t é à seguinte:

$$M'[t]M'' \quad (2.16)$$

O disparo de uma transição é um processo instantâneo, ou seja, as duas ações citadas acima são efetuadas ao mesmo tempo. Assim sendo, não existe nenhum instante no qual todos, ou parte, dos lugares de entrada já contenham menos um *token* e todos ou parte, dos lugares de saída ainda não contenham mais um *token*.

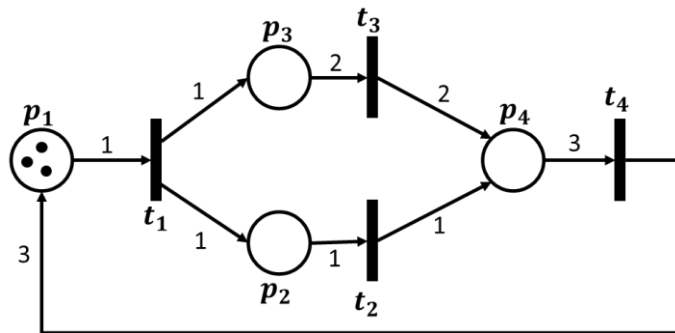


Figura 2.5 – Rede habilitada para disparo de transição t_1

Tendo em consideração a rede da Figura 2.5, temos a alteração da marcação inicial $M_0 = (3, 0, 0, 0)$ da rede marcada R , devido ao disparo da transição t_1 .

Se $M_0[t]M'$ então:

$$M'(p) = M_0(p) - I(p, t_j) + O(p, t_j), \forall p \in P \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ u \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{matrix}$$

$$M_{R'} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

O disparo da transição t_1 provoca alteração na marcação (Figura 2.6), removendo um *token* do lugar p_1 e criando novos *tokens* no lugar p_2 e p_3 . A nova marcação M' é obtida subtraindo-se o vetor marcação atual M_0 pela coluna correspondente à transição disparada da matriz de entrada (I) e somando-se a coluna correspondente à transição disparada da matriz de saída (O).

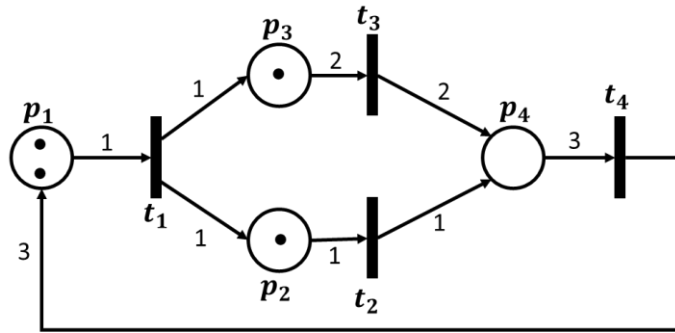


Figura 2.6 – Alteração após disparo de transição t_1

O que acontece, aquando do disparo de uma transição, não pode ser denominado como uma mera mudança de *tokens*, dos lugares de entrada da transição para os lugares de saída, mas sim, como uma remoção de *tokens* nos lugares de entrada e a criação de novos *tokens* nos lugares de saída. Os arcos de saída são, portanto, criadores de novos *tokens* e não simples depositantes dos *tokens* retirados pelos *arcos* de entrada.

Salvo os casos em que a execução é definida critérios, a execução de RdP é não determinística [24]. Quando várias transições são habilitadas em simultâneo, qualquer uma delas pode disparar. Como o disparo é não determinístico e múltiplos *tokens* podem estar presentes em diversos lugares da rede, a RdP é adequada para modelar o comportamento simultâneo de sistemas distribuídos.

No entanto, podemos encontrar dois casos particulares, em que as regras de disparo são distintas da apresentada anteriormente [25].

I. Primeiro caso – uma transição sem qualquer lugar de entrada, é denominada por *transition source* (transição de origem).

(a) Definição de *transition source*: a transição t_i é definida como *source*, se e somente se, $I(p, t) = 0$, para $\forall p \in P$.

II. Segundo caso – uma transição sem qualquer lugar de saída, é denominada de *transition sink* (transição de absorção).

(b) Definição de *transition sink*: a transição t_i é definida como *sink*, se e somente se $O(p, t) = 0$, para $\forall p \in P$.

Uma transição *source* está sempre habilitada e o disparo de uma transição *sink* consome *tokens* nos lugares de entrada, porém, não cria outros recursos. Estes dois casos são demonstrados nas Figura 2.7 e Figura 2.8.

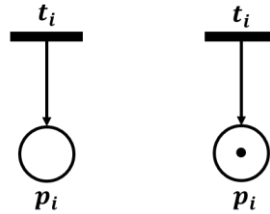


Figura 2.7 – Transition source antes e após o disparo

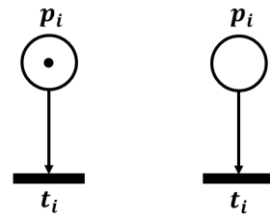


Figura 2.8 – Transition sink antes e após o disparo

2.4.7 Rede pura e self-loop

Os conceitos de *self-loop* e de rede pura são de particular importância, dado que a matriz de incidência de redes impuras não representa a estrutura da rede [13].

É denominado de *self-loop um par* (p_i, t_j) formado por um lugar p_i e uma transição t_j , se p_i é ao mesmo tempo, pré-condição e pós condição de t_j . Para considerar uma RdP como sendo uma rede pura, ela não pode ter *self-loops*.

Definição de rede pura: uma rede R_k é dita pura se, e somente se, não contém nenhum *self-loop*, ou seja,

$$I(p_j, t_i) \times O(p_j, t_i) = 0, \text{ para } \forall t_i \in T, \text{ e } p_j \in P \quad (2.18)$$

Com a introdução de pares *dummy*, uma rede com *self-loops* pode ser transformada numa rede pura (Figura 2.9). Um par *dummy* é formado por um lugar e uma transição, que reunirá assim, condições para refinar um *self-loop*.

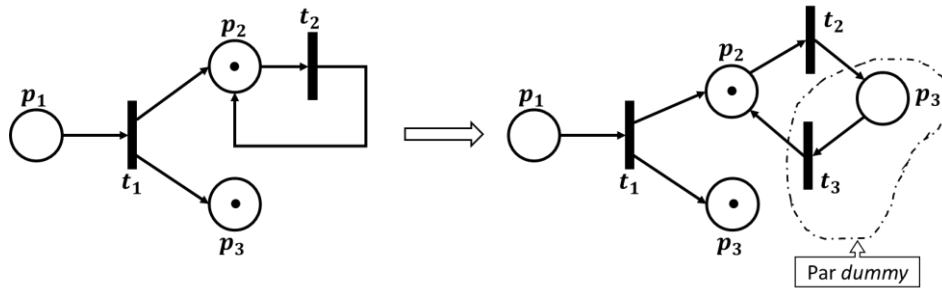


Figura 2.9 – Transformação de uma rede com self-loop em pura

Repare-se que, no refinamento da rede apresentada na Figura 2.9, houve uma substituição do arco de entrada do lugar p_2 ($I(p_2) = t_2$) pelo par *dummy* (p_3, t_3), de maneira que t_2 passa a ser entrada do lugar p_3 e este entrada da transição t_3 . A transição t_3 é então associada como entrada do lugar p_2 .

2.4.8 Equação fundamental

O forte fator diferenciador das RdP das demais ferramentas de modelação, é a existência de uma sólida teoria matemática por detrás.

Uma vantagem de representar uma RdP através de matrizes é que podemos expressar a dinâmica da RdP através da Equação Fundamental das Redes de Petri (EFRP).

A equação da expressão (2.19) é chamada Equação de Estado ou Equação Fundamental das Redes de Petri e define a evolução de um estado para outro dentro de um processo. É essencial saber que é esse formalismo matemático que proporciona mecanismos de análise poderosos, a descrição do comportamento das redes, assim como a possibilidade de análise de propriedades comportamentais e estruturais do modelo e a possibilidade de simular comportamentos díspares do sistema com o intuito de antever possíveis falhas.

$$M'(p) = M_0(p) + C \cdot \bar{s}, \quad \forall p_i \in P \quad (2.19)$$

Os vetores $M'(p)$ e $M_0(p)$ já são conhecidos das seções como sendo a marcação inicial e a marcação no estado p , o C é a matriz de incidência dada por $I = (Pós - Pré)$ e \bar{s} é o vetor característico da rede, o qual representa a quantidade de vezes que uma determinada transição foi disparada.

O termo $C \cdot \bar{s}$ define uma equação de estado, ou seja, qual será a próxima marcação $M'(p)$ obtida a partir da marcação inicial $M_0(p)$ se uma sequência específica de disparo de transição ocorrer.

O vetor (2.20) é denominado vetor característica e é representado por \bar{s} .

$$[s(t_0)^T + s(t_1)^T + \dots + s(t_k)^T] \quad (2.20)$$

Definição de vetor característica: o vetor característica \bar{s} de uma rede $R = (P, T, I, O, K)$ é um vetor de dimensão igual a $\#T$, onde os componentes deste vetor representam o número de disparos de cada transição [13].

2.5 Classes das Redes de Petri

Atendendo às dificuldades com que se depara em algumas fases do processo de desenvolvimento dos sistemas das redes ordinárias, onde subsiste a necessidade de representar um sistema em evolução com um maior ou menor pormenor, de forma mais compacta na especificação, a literatura fornece diferentes classificações para as RdP.

Embora existam outras classificações, abaixo são apresentadas extensões de redes clássicas extraídas da literatura consultada durante a produção deste documento.

- Redes de Petri Ordinárias:
 - (a) Redes de Petri Binárias – são as redes mais elementares de todas. Estas redes só permitem no máximo um *token* em cada lugar, e todos os arcos possuem valor unitário.
 - (b) Redes de Petri Lugar-Transição – permitem o acumular de *tokens* no mesmo lugar, assim como valores não unitários nos arcos.
- Redes de Alto Nível (não-ordinárias):
 - (a) Redes de Petri Coloridas;
 - (b) Redes de Petri Hierárquicas;
 - (c) Redes de Petri Temporizadas:
 - ✓ RdP Temporizadas Determinísticas;
 - ✓ RdP Temporizadas Estocásticas.

A característica fundamental das RdP de alto nível reside nos seus tipos de marcas, uma vez que há possibilidades de as marcas não serem iguais entre si, correspondendo a elementos de um domínio. Desta forma, as marcas podem conter muito mais informações. Estas já não se limitam à simples presença ou não do(s) *token(s)* num determinado lugar, podendo conter dados relativos à sua caracterização com indivíduo distinto dos restantes [1].

2.6 Poder representacional

De acordo com Wang [25], as características típicas exibidas pelas atividades num SDED, como a concorrência, a tomada de decisão, a sincronização e as prioridades, podem ser modeladas efetivamente pelas RdP. As estruturas representas nas RdP, nas figuras abaixo, as quais são uma adaptação da representação das caraterísticas das atividades do SDED, apresentada por Wang [25].

- I. *Execução Sequencial* – De acordo com a representação da Figura 2.10, a transição t_2 só pode disparar após ocorrer o disparo do t_1 , ou seja, t_2 só fica habilitada após ocorrência do disparo de t_1 . Isso impõe a restrição de precedência t_2 após t_1 . Após a execução dessa ação, pode-se ter outra ação, desde que satisfaça as condições.

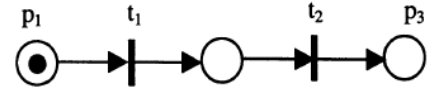


Figura 2.10 - Sequencial

- II. *Conflito* – A representação de transições t_1 e t_2 em conflito encontra-se exposta na Figura 2.11. Ambos estão habilitadas, mas o disparo de qualquer uma dessas transições leva à desativação da outra transição. Situação do género surgirá, por exemplo, quando uma máquina deve escolher entre tipos de peças ou uma peça deve escolher entre várias máquinas. O conflito resultante pode ser resolvido de forma puramente não-determinista ou de forma probabilística, atribuindo

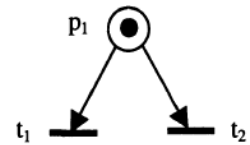


Figura 2.11 - Conflito

- III. *Concorrência* – Na Figura 2.12, a transição t_1 e t_2 são concorrentes. Concorrência é um atributo importante das interações DEDS. Observe-se que uma condição necessária para que as transições sejam concorrentes é a existência de uma transição de bifurcação que deposita um *token* em dois ou mais locais de saída.

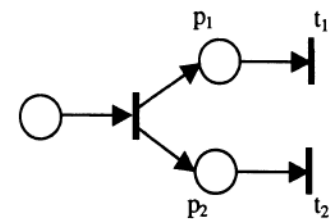


Figura 2.12 - Concorrência

- IV. *Sincronização* – A sincronização resultante de atividades pode ser capturada por transições do tipo mostrado na Figura 2.13. Aqui, a transição t_1 é habilitada somente quando existirem *tokens* tanto em p_1 quanto em p_2 , estabelecendo-se, assim, o sincronismo. Essencialmente, a transição t_1 modela a operação de junção.

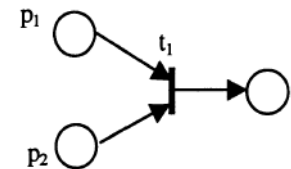


Figura 2.13 - Sincronização

- V. *Fusão* – Um exemplo que pode expressar a fusão é quando temos uma situação onde chegam várias peças de diversas origens para um armazém central; a situação resultante pode ser considerada uma fusão e, encontra-se representada na Figura 2.14.

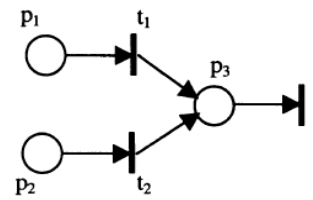


Figura 2.14 - Fusão

- VI. *Confusão* – A confusão é uma situação em que a concorrência e os conflitos coexistem. Podemos tomar a Figura 2.15 como exemplo da representação de uma rede na situação de confusão. Tanto t_1 como t_3 são concorrentes enquanto t_1 e t_2 estão em conflito, e t_2 e t_3 também estão em conflito.

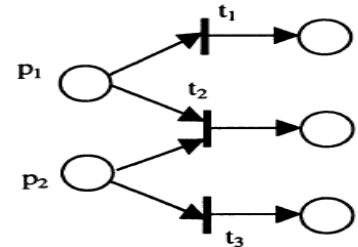


Figura 2.15 - Confusão

- VII. *Mutuamente exclusivo* – Dois processos são mutuamente exclusivos, se eles não podem ser executados ao mesmo tempo devido a restrições no uso de recursos compartilhados. A Figura 2.16 mostra essa estrutura. Por exemplo, um robô pode ser compartilhado por duas máquinas para carga e descarga. Duas dessas estruturas são exclusão mútua paralela e exclusão mútua sequencial.

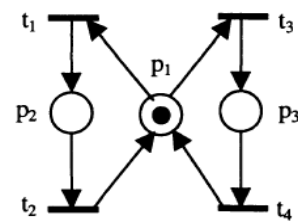


Figura 2.16 – Mutuamente exclusivo

- VIII. *Prioridades* – As redes clássicas de Petri discutidas até agora não possuem mecanismos para representar prioridades. Esse poder de modelação pode ser conseguido através da introdução de um arco inibidor. O arco inibidor conecta um lugar de entrada a uma transição e é representado picturalmente por um arco terminado com um pequeno círculo. A presença de um arco inibidor que liga um lugar de entrada a uma transição altera as condições de ativação de transição. Na presença do arco inibidor, uma transição é considerada habilitada se cada ponto de entrada, conectado à transição por um arco normal (um arco terminado com uma seta), contém pelo menos o número de *tokens* igual ao peso do arco, e não haja *tokens* presentes em cada local de entrada conectado à transição pelo arco inibidor. A regra de disparo de transição é a mesma para lugares normalmente conectados. O disparo, no entanto, não altera a marcação nos locais conectados ao arco inibidor. Uma rede de Petri com um arco de inibidor é apresentada na Figura 2.17. t_1 é habilitado se p_1 conter um *token*, enquanto t_2 é habilitado se p_2 conter um *token* e p_1 não possuir *tokens*. Isso dá prioridade a t_1 sobre t_2 .

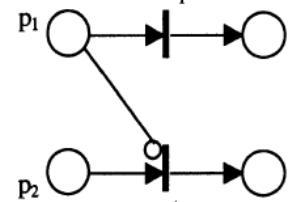


Figura 2.17 - Prioridade

2.7 Propriedades das redes de Petri

As RdP possuem propriedades **estruturais** e **comportamentais**, as quais se encontram amplamente documentadas pelos diversos autores, nomeadamente [16], [19] e [10]. As propriedades das RdP são classificadas em comportamentais ou estruturais conforme sejam ou não dependentes da marcação inicial [16].

Alusivas às propriedades comportamentais são [16]: a alcançabilidade, a limitabilidade, a vivacidade, a reversibilidade, a cobertura, a persistência, a distância sincrónica e a justiça.

Respeitantes às propriedades estruturais referenciam-se como de especial importância [16]: vivacidade estrutural, controlabilidade, limitabilidade estrutural, conservabilidade, repetibilidade, consistência e justiça-B estrutural.

2.8 Fiabilidade de modelação (modelação) com Redes de Petri estocásticas

Uma vantagem do modelo de *Stochastic Petri Nets* (SPN) quando usado para modelar os processos de manutenção, é a sua capacidade de lidar eficazmente com as ações da Manutenção Preventiva (MP). A modelação das ações de MP, em particular a quantificação do efeito de realizar ações de MP em diferentes intervalos, é uma das atividades de manutenção mais difíceis de modelar ao usar o processo estocástico como estrutura de modelação [3] e [12].

A estrutura de SPN tem um poder de modelação superior ao da estrutura de processo de *Markov*. Esse maior poder de modelação é a principal razão que motivou a introdução da estrutura de SPN para modelação de problema de fiabilidade. É de assinalar que este maior poder de modelação não é livre, e isto acontece graças ao número de ferramentas analíticas que podem ser usadas para avaliar o modelo [16].

CAPÍTULO 3. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é feita uma caracterização geral do edifício onde se desenvolveu o estudo do caso, mas dando maior destaque às características técnicas do sistema alvo de estudo, suportado pelos elementos recolhidos durante as visitas ao hospital.

3.1.1 Caraterização do Edifício

A unidade hospitalar nacional de padrão europeu escolhida para o estudo em causa, encontra-se implementada num terreno com cerca de 6 hectares, com uma área total de construção de 90.000 m², e é constituída por:

- *Edifício principal* – composto por 21 corpos estruturais, onde estão instalados todos os serviços de prestação de cuidados de saúde. Este edifício principal, contém 14 níveis distintos que se situam entre o piso 7 e o piso 4.
- *Edifício de apoio* – onde funcionam os serviços de instalações e equipamentos, armazéns, oficinas e centrais térmicas.

Para além dos dois edifícios acima mencionados, a unidade hospitalar ainda dispõe de *duas Portarias e um Heliporto*.

O edifício, destinado a alojar no seu interior todos os equipamentos descritos abaixo, está projetado em conformidade com as normas vigentes relativamente aos Regulamentos de Segurança, no que é referente à sua situação, acessibilidade, passagens e acessos, condições e armazenamento de fluídos combustíveis e de água, esgotos e canalizações.

3.2 Caraterização do Sistema de Alimentação Elétrica

Para assegurar o correto funcionamento das instalações do Hospital alvo de estudo, a alimentação ao edifício é estabelecida a partir da rede pública de Média Tensão (MT) de 15 kV e à frequência de 50 Hz, através de um ramal aéreo da EDP em duas linhas de abastecimento díspares.

As instalações do Hospital também estão equipadas com uma central de emergência que fará o socorro das instalações elétricas no geral, dado esta ter sido considerada uma conceção para a distribuição de energia do tipo rede única (normal/emergência). Assim, para obstar eventuais falhas de energia na rede pública de MT, o hospital encontra-se equipado com um sistema de alimentação de energia de socorro, instalado em dependência própria, no piso -2 do edifício, junto ao Posto de Transformação e Seccionamento, dois grupos geradores de emergência e, mais um grupo junto ao compartimento das caldeiras industriais e do quadro dos equipamentos mecânicos.

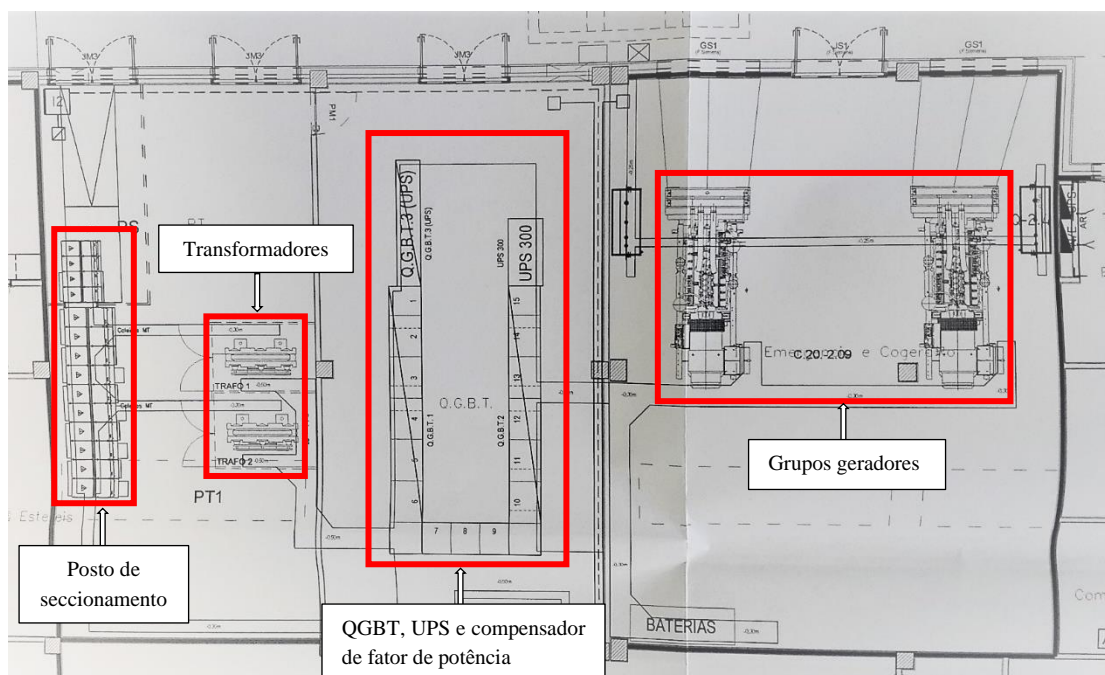


Figura 3.1 - Planta das Instalações de Potência do Hospital

3.2.1 Posto de seccionamento e de transformação

No Posto encontram-se alojados as celas correspondentes e transformadores de potência, respeitando-se em todo o caso as distâncias mínimas regulamentares entre os elementos.

O Posto de Transformação e Seccionamento é do tipo interior, composto por celas pré-fabricadas em invólucro metálico, instaladas em compartimento no piso -2. As celas são modulares, de isolamento em ar, equipadas com aparelhagem fixa que utiliza o gás hexafluoreto de enxofre (SF_6) como elemento de corte e extinção, homologado pela Direção Geral de Energia.



Figura 3.2 - Posto de Seccionamento

O Posto de seccionamento é constituído por duas celas de corte em SF_6 , 17,5 kV/ 630 A/ 20 kA, do tipo interruptor-seccionador para fazer o anel, entrada e saída, e ainda é constituído por

uma cela de corte em SF₆, 17,5 kV/ 630 A /20 kA, destinada ao corte geral da instalação do lado da EDP e contagem em Média tensão.

A separação física entre o Posto de Seccionamento (PS) e o Posto de Transformação (PT) é efetuada através de uma cela de ganho intercalar, onde se intercala a rede de separação entre o PS da EDP e o PT do hospital. Esta rede de proteção impede o acesso direto de pessoas não autorizadas entre ambos os Postos.



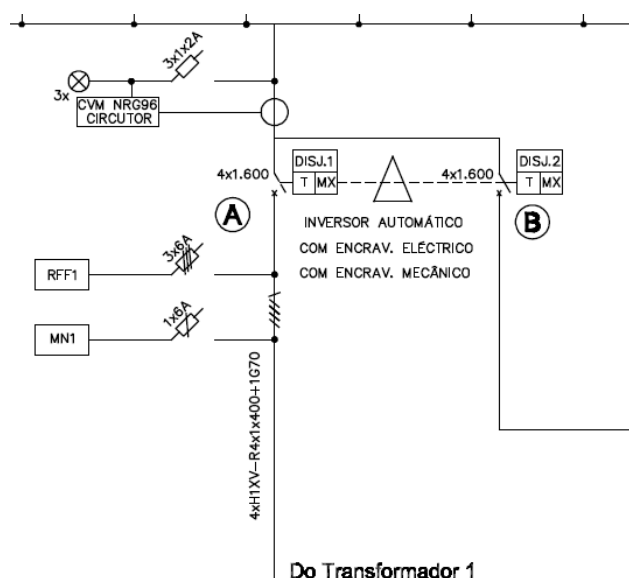
Figura 3.3 – Posto de Transformação

O PT do Hospital encontra-se munido de uma cela de corte geral da instalação, tipo cela disjuntor de corte em SF₆, 17,5 kV/ 630 A/ 20 kA, e a proteção aos transformadores é efetuada através de três celas tipo disjuntor de corte em SF₆, 17,5 kV/ 630 A/ 20 kA.

O PS do hospital é ainda constituído por uma célula de reserva para disjuntor de corte em SF₆, 17,5 kV/ 630 A/ 20 kA, não equipada, de características idênticas às anteriores, que efetuará a futura interligação do eventual sistema de cogeração com a rede da EDP, que não poderá funcionar em sistema de ilha.

Todos os comandos do interruptor-seccionador, disjuntor e do seccionador de facas de terra estão agrupados num painel frontal onde existe um sinótico com as indicações do estado de funcionamento de cada comando. As informações da presença de tensão presentes no indicador do painel frontal, também são transmitidas à gestão técnica, para que possa tomar as decisões de comando da aparelhagem de média tensão.

O PT é ainda constituído por três transformadores secos de 1000 kVA cada, 15 kV/ 400-200 V/ 50 Hz, obedecendo às Normas Portuguesas NP443 e NP2627, com neutro acessível em Baixa Tensão (B.T.) e refrigeração natural, encapsulados em resina *epoxy*. As suas características mecânicas e elétricas estão de acordo com as normas e recomendações internacionais IEC 76 & 726 e as normas particulares da própria empresa distribuidora.



Trafo 1

Figura 3.4 – Esquema elétrico do trafo 1

A proteção térmica dos transformadores é feita através de relé, encontrando-se ligada à central de gestão técnica para que possa transmitir eventuais alarmes de aquecimento excessivo (temperatura de alarme) dos transformadores e, também, diretamente à bobine de abertura do disjuntor de media tensão, para que, em caso de aquecimento excessivo anormal do transformador, o disjuntor de média tensão se abra. A rede de proteção impede o acesso direto de pessoas não autorizadas à zona dos transformadores.

3.2.2 Quadros Gerais de Baixa Tensão

Os Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBT), apetrechados com todo o equipamento de proteção, comando e sinalização, ficam alojados em sala contígua ao Posto de Transformações e Seccionamento. Os outros quadros elétricos, gerais e parciais, encontram-se instalados em locais apropriados, mais precisamente no centro das cargas que alimentam e dispõem de toda a aparelhagem de comando e proteção, nomeadamente interruptores e disjuntores diferenciais, disjuntores eletromagnéticos, contactores, interruptores de quadro, interruptores horários, sinalizadores de presença de rede, transformadores, descarregadores de sobretensões e analisadores de rede.

Nos serviços em que as instalações elétricas são protegidas por transformadores de isolamento, os respetivos quadros elétricos possuem uma alimentação redundante, ou seja, têm uma linha prioritária ligada ao setor assistido por UPS e uma linha secundária ligada ao quadro normal/emergência, pelo que estes quadros têm duas entradas (dois cortes gerais) que são encravadas entre si, de modo a garantir a perfeita segurança das instalações e das pessoas.

Os quadros são IP40 e IK07, adequados aos locais onde estão instalados e, são sectorizados de acordo com os circuitos a alimentar, nomeadamente criando sectores independentes para as

instalações elétricas gerais, para as instalações elétricas específicas dos equipamentos mecânicos e para as instalações elétricas específicas das instalações hidráulicas.



Figura 3.5 – Quadros Gerais de Baixa Tensão

O QGBT é do tipo múltiplo modulado, sendo constituído por celas metálicas fechadas interligadas entre si e constituídas com base na norma CEI 439- 1.

Os barramentos dos transformadores 2 e 3 estão dimensionados para correntes de 3.200 A, enquanto que o barramento do transformador 1 está dimensionado para 1.600 A.

Relativamente aos disjuntores de saída, são todos omipolares de 50 kA e os gerais de entrada são de 1.600 A, equipados com bobina de disparo MX, que poderá ser acionada na sala do QGBT, através da botoneira de emergência aí instalada para esse efeito.

Para permitir o eventual telecomando por sistema de gestão centralizada, os disjuntores interbarras de 3.200 A e 1.600 A são motorizados.

O QGBT está equipado com três barramentos, cada um deles alimentado individualmente por cada um dos transformadores de 1000 kVA, e ainda um quarto barramento alimentado pela UPS de apoio às instalações socorridas do hospital.

Esta configuração permite uma melhor sectorização das cargas, sendo alimentadas sem que haja paralelo dos transformadores, no decurso normal da exploração, pese embora os barramentos e os órgãos de proteção sejam dimensionados para a eventualidade do paralelo, que ocorrerá sempre que se fizer manobras de transferência de cargas.

Entende-se por sectorização, o agrupamento de saídas de acordo com os circuitos a alimentar, nomeadamente criando sectores independentes para as instalações elétricas gerais, para as instalações elétricas específicas dos equipamentos mecânicos e para as instalações elétricas específicas das instalações hidráulicas.

Por outro lado, como os barramentos se podem interligar, os dois primeiros através de disjuntores interbarras poder-se-á, em operação de manutenção e mesmo de exploração, quando as pontas o permitirem, ter apenas um dos transformadores em serviço, podendo por exemplo

fazer as operações de manutenção (limpeza) no outro, sem perturbar o fornecimento de energia ao edifício.



Figura 3.6 – Disjuntores interbarras do QGBT

O barramento central, que interliga os dois barramentos acima referidos, permite a alimentação daqueles barramentos com energia socorrida pelos grupos eletrogéneos, podendo a mesma ser simultânea, caso geral, quer em situações de manutenção/exploração, como atrás se referiu, alimentar apenas um dos barramentos.

Para complementar esta configuração e dar ainda fiabilidade à exploração das instalações, os disjuntores interbarras motorizados têm um *bypass* manual para que qualquer avaria no motor do disjuntor não ponha em causa o fornecimento de energia elétrica.

Todas estas operações podem ser controladas, quer localmente, quer através do sistema de gestão técnica (só os motorizados e os disjuntores equipados com contactores), o que torna a instalação versátil e funcional.



Figura 3.7 – Autómato do sistema de funcionamento de gestão de interbarras

No QGBT, todas as saídas que alimentam outros quadros dispõem ainda, além do disjuntor magneto térmico, com poder de corte não inferior a 50 kA, de um relé diferencial com toro separado, de modo a proteger individualmente cada uma delas contra correntes de defeito, garantindo assim a segurança das instalações sem afetar a totalidade das mesmas em caso de atuação.

Os disjuntores interbarras motorizados podem ser comandados pela gestão técnica que recebe informação do regime de funcionamento dos grupos através da porta RS232 ou 485, para que a entrada em funcionamento dos grupos e a transferência de cargas para estes se faça de forma temporizada, isto é, as cargas só serão transferidas quando os grupos estabilizarem o seu regime de carga, e isto evitará que estes “aninhem” no arranque.

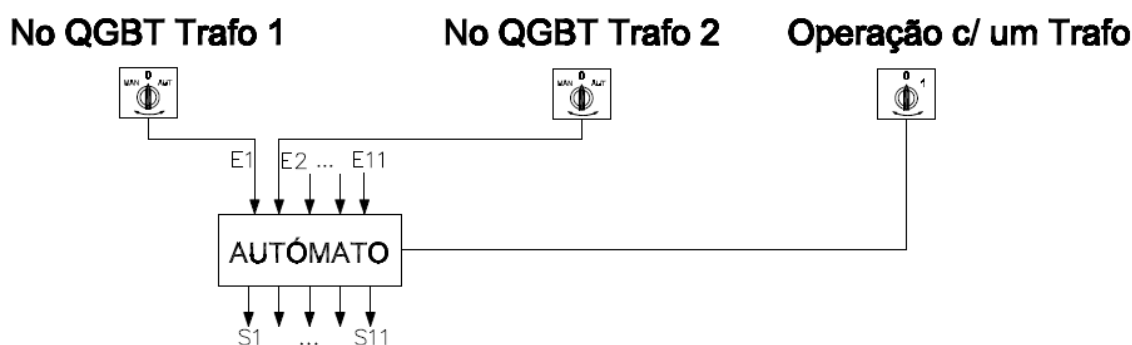


Figura 3.8 – Esquema do autômato do sistema de gestão de interbarras

O quadro de comando e transferência dos grupos eletrogéneos também dispõe de um sistema de sincronismo entre os dois grupos, pois só poderão entrar em funcionamento paralelo depois de encontrado o sincronismo entre ambos os grupos. Este quadro dispõe de um barramento central alimentado pelo paralelo dos grupos eletrogéneos, 2 x 1000 kVA.

É de salientar que, qualquer intervenção que seja necessário realizar na gestão técnica, quer afete estes equipamentos ou outros, terá de ser precedida de inserção de “password” de segurança, definida no quadro de gestão para estas instalações, e restrita aos quadros técnicos especializados e formados para o efeito.

3.2.3 Compensação de fator de potência

Para efetuar a correção do fator de potência, encontram-se instaladas duas unidades de baterias de condensadores ligados aos dois barramentos normais dos QGBT.

As baterias dos condensadores estão agrupadas de forma a estabelecerem-se andares de compensação controlados por relés varimétricos de escalões correspondentes à bateria.



Figura 3.9 – Unidade de baterias de condensadores

Relativamente às características, o condensador é do tipo seco (sem impregnantes) autocicatrizante (em caso de defeito interno de isolamento, o condensador restabelece o isolamento instantaneamente no local da perfuração), com capacidade compreendida entre 0,95 e 1,1 vezes o valor nominal, tensão nominal/frequência de 400V/50 Hz e sobreintensidades devido às harmónicas de 30%.

O fator de perdas varia entre $0,2 \times 10^{-3}$ e $0,3 \times 10^{-3}$, conforme a potência. Este valor corresponde a uma potência dissipada de cerca de 0,4 W por kVAr.

As potências nominais das baterias utilizadas nos condensadores são de 300 kVAr, ou seja, 30% do valor nominal dos transformadores.

São constituídas de forma a proporcionar cinco escalões de compensação cada uma, incorporando por isso os relés varimétricos que comandam os contactores que estabelecem o paralelo dos condensadores.

As baterias dos condensadores são protegidas por disjuntores de 630 A.

3.2.4 Alimentação ininterrupta de energia eléctrica (UPS)

Para assegurar o fornecimento de energia eléctrica sem que haja interrupções durante o período de transição entre a rede eléctrica publica e os grupos dos geradores de socorro da unidade hospitalar, o sistema encontra-se equipado com duas UPS's centrais de 300 kVA cada, instaladas no mesmo espaço físico onde se encontram os QGBT e as unidades de baterias para a compensação do fator de potência e, como reforço para salvaguardar eventuais falhas da UPS central, existem mais vinte UPS's de 20 kVA cada, distribuídas pelos serviços hospitalares de maior relevância, nomeadamente o bloco operativo e os cuidados intensivos, devido as consequências de elevada gravidade a nível humano, que se podem advir dos casos de falhas no fornecimento de energia eléctrica. Para além das vinte UPS's, existe ainda uma UPS de 8

kVA de potência, exclusiva para acautelar as possíveis falhas de fornecimento de energia elétrica ao sistema de controlo e comando do QGBT.



Figura 3.10 – Unidade central de alimentação ininterrupta de energia elétrica

Todas as UPS's dispõem de retificador equipado com correção ativa do fator de potência, inversor tipo *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGTB), controlado por microprocessador, carregador de baterias, interruptores de *bypass* manual e comutador estático, e estão associados a baterias de chumbo herméticas, do tipo sem manutenção, dimensionadas para o período de autonomia de 15 minutos. A UPS central e as UPS's afetas ao bloco operatório, cuidados intensivos e intermédios e cirurgia ambulatoria têm entrada e saída trifásicas, as UPS's da diálise e da urgência têm entrada trifásica e saída monofásica e, a UPS de apoio a dispositivos de controlo e comando do QGBT tem entrada e saída monofásicas.

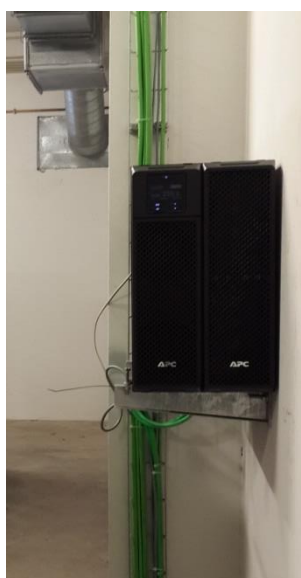


Figura 3.11 – UPS de dispositivos de controlo e comando do QGBT

Na condição normal de serviço, a alimentação das cargas a cada Sistema Estático de Alimentação Ininterrupta é assegurada em contínuo pelo inversor IGBT, o qual, por sua vez, é

alimentado pela rede através do retificador/carregador de corrente alternada/corrente contínua (CA/CC), que corrige o fator de potência para um valor superior a 0,95, de forma a diminuir o consumo de energia reativa, sendo o seu arranque efetuado em rampa tipo “*soft start*” para diminuir o impacto à entrada.

O inversor IGBT, que converte a corrente contínua em corrente alternada “limpa” e estabilizada, fica constantemente sincronizado com a rede, permitindo assim a transferência da carga do inversor para o circuito de *bypass* automático (linha direta), através do comutador estático. Esta situação deverá ocorrer sem quaisquer cortes na alimentação, nos casos de sobrecarga ou de paragem do inversor.

O inversor IGBT está constantemente sincronizado com a rede de reserva, de maneira a permitir a transferência da carga do inversor para a linha direta em caso de sobrecarga ou de paragem do inversor, sem qualquer interrupção da alimentação das cargas. Ou seja, o comutador estático monitorizado garante que o inversor acompanha a frequência na linha direta (de reserva).

Em caso de paragem do inversor IGBT, voluntária ou provocada por sobrecarga do inversor IGBT, a unidade UPS será automaticamente alimentada pela rede de reserva (linha direta), sem solução de alimentação ininterrupta. Após a cessação da ocorrência, o aparelho retorna automaticamente ao inversor.

No caso de sobrecarga com rede não idónea – valores de tensão e de frequência fora dos limites admissíveis – o Sistema de Alimentação ininterrupta não transfere a carga, continuando a alimentá-la através do inversor durante um tempo que depende da sobrecarga e das características da UPS.

Como referido anteriormente, o Sistema Estático de Alimentação Ininterrupta é gerido por microprocessador, que proporciona um sistema de diagnóstico completo, de fácil perceção para os utilizadores, evidenciando através de *display* com led's as indicações, as medidas, os alarmes e os modos de funcionamento, nomeadamente as várias situações de estado de carga, incluindo sobrecarga, funcionamento em *by-pass* e a capacidade disponível das baterias. São disponibilizadas indicações para manter os utilizadores informados sobre estes estados anormais de funcionamento.

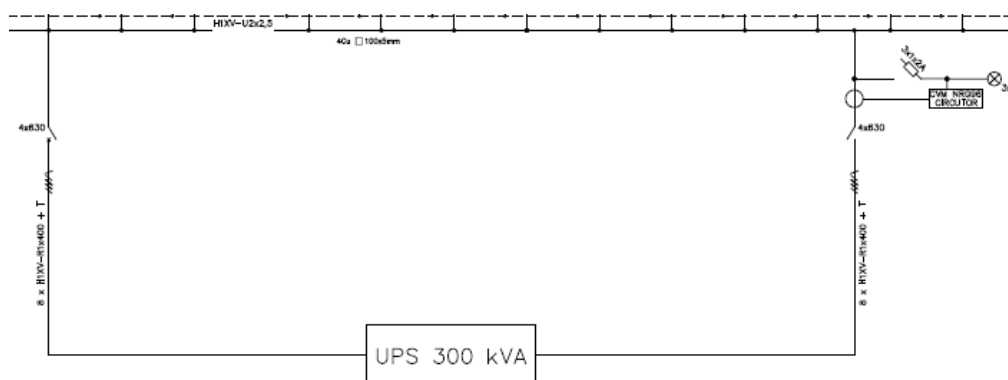


Figura 3.12 – Esquema elétrico do sistema de UPS central

Na ausência da rede principal, ou se a mesma sair dos limites de tolerância admitidos, a alimentação aos aparelhos é garantida pelas baterias, através do inversor. Durante esta fase, as baterias estarão, naturalmente, em condições de descarga, uma vez que a energia fornecida às instalações de utilização é garantida pelas baterias. Os utilizadores são avisados do estado de funcionamento através de indicações visuais e acústicas. Uma sinalização específica indicará a capacidade residual das baterias.

Quando a rede principal regressa aos limites estabelecidos, o Sistema Estático de Alimentação Ininterrupta volta a funcionar automaticamente no modo normal. Mesmo que as baterias estejam completamente descarregadas, o carregador de baterias arranca de modo automático e recomeça imediatamente a carregar a bateria de acumuladores, de maneira a reintegrar a carga máxima no menor tempo possível.

Com a finalidade de salvaguardar as baterias dos danos decorrentes das descargas profundas – descargas com carga reduzida – a tensão de bloqueio do inversor varia automaticamente em função do tempo de descarga. De modo a proteger a vida útil estimada das baterias, a tensão da carga tampão das mesmas é compensada automaticamente em função da temperatura ambiente.

As baterias têm uma vida útil estimada de dez anos para o caso da UPS central e UPS's do bloco operativo, e cuidados intensivos e intermédios, e de cinco anos para as restantes UPS's de menor potência (diálise, urgência e circuitos auxiliares do QGBT), devendo garantir o fornecimento da potência nominal da UPS em caso de corte total da rede de alimentação principal e de emergência, durante o período de autonomia.

Na tabela abaixo encontra-se indicadas de forma resumida as características gerais das UPS's de maior relevância para o sistema.

Tabela 3.1 – Características gerais de cada uma das UPS's

Serviço	Potência (kVA)	Autonomia (minutos)	Vida útil baterias (anos)	Entrada/Saída Trifásica (T) Monofásica (M)
Rede Informática UPS central “QGBT”	300	15	10	T/T
Bloco Operatório	2 × 30 (paralelo)	60	10	T/T
Cuidados Intensivos e Intermédios	2 × 30 (paralelo)	60	10	T/T
Cirurgia Ambulatório	20	30	10	T/T
Urgência	10	30	5	T/M
Díalise	10	30	5	T/M
QGBT (cuidados auxiliares)	6	15	5	M/M
QGBT (dispositivo de controlo e comando de interbarras)	8	15	5	M/M

A unidade UPS central encontra-se equipada com um interruptor interno de *by-pass* manual, que permite transferir, sem interrupção, a carga à rede de reserva, possibilitando assim desligar e isolar totalmente a UPS para levar a cabo eventuais operações de manutenção com total segurança.

3.2.5 Central de emergência

O sistema de alimentação de energia de socorro foi concebido de forma a cumprir as normas e regulamentos aplicáveis, nacionais e da EU, nomeadamente as que estabelecem os requisitos das diretivas do sector de máquinas elétricas e de construtores. As disposições regulamentares a respeitar incluem o Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Elétrica (RSIUEE), as diretivas da EU de segurança de máquinas 89/892/CEE, o regulamento eletrotécnico da baixa tensão e a compatibilidade eletromagnética 89/336/CEE.



Figura 3.13 – Grupo eletrogéneo

A central de emergência projetada em caso de necessidade fará socorro das instalações elétricas no geral, dado ter sido considerada uma conceção para a distribuição de energia do tipo rede única (normal/emergência). Assim, para obstar eventuais falhas de energia na rede pública de média tensão, o hospital encontra-se equipado com um sistema de alimentação de energia de socorro, instalado em dependência própria, no piso -2 do edifício, junto ao posto de transformação e seccionamento, dois grupos de emergência e, mais um grupo junto ao compartimento das caldeiras industriais e do quadro dos equipamentos mecânicos.

Estes grupos eletrogéneos estão dimensionados para uma potência no serviço principal de 1000 kVA (*Prime Power*) cada, fator de potência de 0.8 e 1500 rpm, funcionando em paralelo síncrono e, no serviço de emergência, trifásicos, 50 Hz, de potência de 1100 kVA (*Stand by Power*), segundo ISO 8528-1. A potência dos grupos foi determinada de modo a socorrer na totalidade os dois barramentos prioritários do QGBT.

No quadro de comando e transferência dos grupos eletrogéneos encontra-se instalado um sistema de sincronismo entre os dois grupos, pois só poderão entrar em funcionamento em paralelo depois de encontrado o sincronismo entre ambos os grupos. Este quadro dispõe de um barramento central alimentado pelo paralelo dos grupos eletrogéneos 2×1000 kVA.

As operações de deslastre são perfeitamente acessíveis, através da gestão técnica centralizada, pois todos os cortes gerais dos quadros têm contactores que permitem o seu acionado pela gestão técnica. Além disso, muitas saídas individualizadas, nomeadamente nos sectores dos quadros elétricos das mecânicas – unidades de tratamento de ar (UTA), ventiladores, ventiloconvectores e bombas das instalações hidráulicas – também possuem contactores que permitem a mesma função.

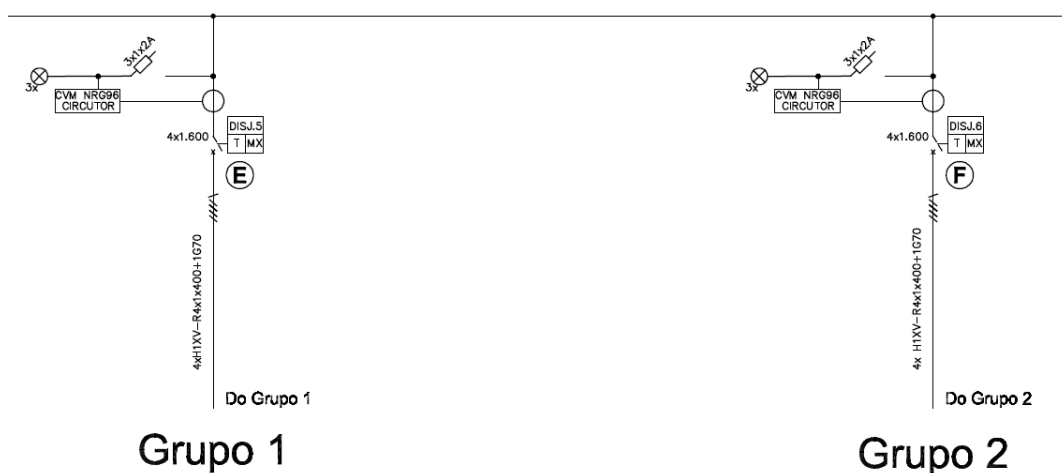


Figura 3.14 – Esquema elétrico do sistema de fornecimento da eletricidade através dos grupos

Todos estes contactores possuem um contacto auxiliar para poderem transmitir a informação relativa ao seu estado (aberto/fechado) à gestão técnica centralizada. A categoria de emprego destes contactores é definida pela norma CEI 947-3 como sendo AC-1.

Os grupos de geradores de emergência, projetados para funcionamento em paralelo, entrarão automaticamente em serviço em caso de falha da rede ou abaixamento de tensão nominal para além do limite de regulação considerado, ou ainda no caso de avaria dos transformadores. Isto é, o sistema de vigilância e controlo realiza de forma automática a vigilância da rede e, perante uma falha da mesma (seja numa ou nas três fases), efetua a ligação do consumo aos grupos através de contactores com encravamento eletromecânico. No retorno da rede, logo que o(s) transformador(es) em condições de funcionamento tome(m) a carga, os grupos saem do barramento mantendo-se a trabalhar em vazio por um determinado tempo, até posterior ordem de paragem do mesmo. O comando do funcionamento é feito através do quadro de comando, controlo e transferência própria.

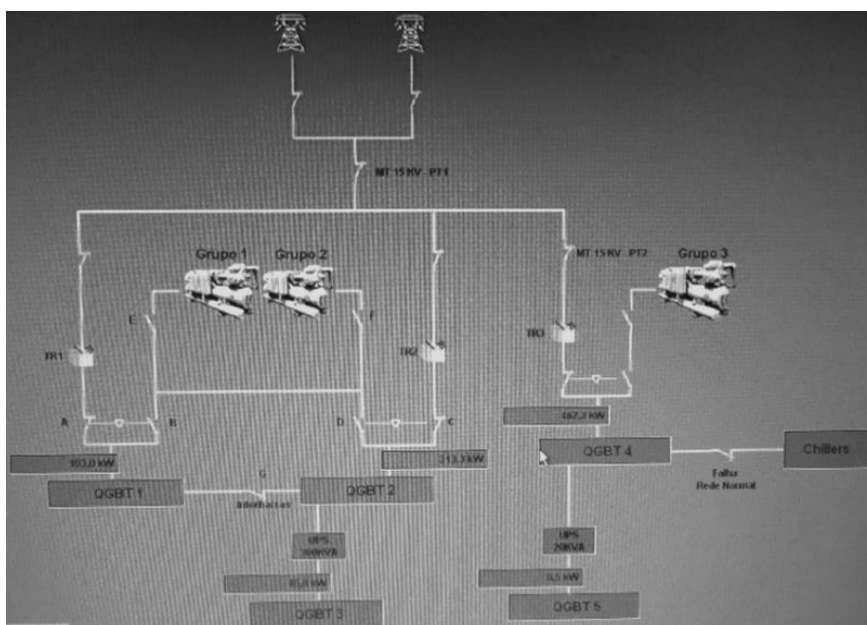


Figura 3.15 – Controlo da gestão técnica

É possível selecionar o funcionamento do grupo de forma manual ou automática. Em funcionamento manual, a paragem é efetuada através de comando e o arranque e a transferência são realizados mediante a utilização do seletor.

Como medida de segurança existe encravamento elétrico entre os IBM (disjuntores interbarras motorizados) e o disjuntor de proteção das saídas do respetivo transformador, de modo a que os grupos não possam, em caso algum, ficar a trabalhar em paralelo com a rede. O quadro é microprocessado, tendo um ecrã de cristal líquido, onde se fazem as leituras e correm os menus do programa, fazendo-se a parametrização das manobras e dos *setpoints*. Todas estas informações e alarmes são disponibilizadas à gestão técnica para monitorização do funcionamento dos grupos.

Para alimentar de combustível os motores dos grupos eletrogéneos, foi instalada uma cisterna (enterrada e envolvida numa caixa de areia macia) com capacidade para armazenar 5000 litros de fuel, com sistema de bombagem automática para três depósitos (diários) de 500 litros cada, que estão integrados na estrutura dos chassis de cada um dos grupos. Estes depósitos são mantidos sempre cheios, por um sistema automático de flutuadores que, em caso de baixa do nível de combustível, acionam a eletrobomba respetiva que efetua a trasfega do combustível da cisterna do exterior para o depósito. O controlo da bombagem, bem como das outras ações inerentes à central de emergência é comandado pelo quadro de comando e transferência que transmite os alarmes para o posto de controlo da gestão técnica.

Para cumprir o regulamento de ruído, foram tomadas as medidas necessárias e, assim, as entradas para ventilação dos equipamentos estão munidas de atenuadores e, na construção civil do espaço, tiveram em conta cuidados redobrados no isolamento acústico e na transmissão de vibrações.

Os dois conjuntos motor-alternador estão assentes numa base comum de construção rígida, designada por fixe, de elevada resistência à torsão. A ligação de cada motor ao respetivo alternador é através de união flexível. Os gases resultantes da combustão dos motores são lançados diretamente para o exterior, passando antes por paredes de escape com silenciador.

3.3 Estratégia de Construção do Modelo da RdP do sistema

Esta seção tem como objetivo principal escalonar o sistema elétrico do hospital em estudo, de forma a facilitar o processo de modelação para análise de desempenho e aperfeiçoamento.

A estratégia adotada no escalonamento do sistema para facilitar a modelação do mesmo seguiu os seguintes passos:

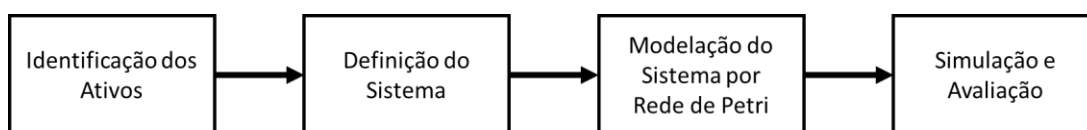


Figura 3.16 – Blocos referentes à implementação do processo

- Identificação do sistema
 - ✓ A principal atividade é obter os dados necessários referentes à identificação dos ativos no seu contexto operacional.
- Definição do sistema
 - ✓ De acordo com a identificação precedente definiu-se as funções dos ativos.
- Modelação do sistema
 - ✓ Depois de obtidos os dados sobre a identificação e definição do ativo, implementou-se a modelação do sistema com um Diagrama de Blocos Funcional (*Functional Block Diagram*), de acordo com as funções dos ativos.
- Simulação e avaliação do sistema
 - ✓ Depois das modelações implementadas, a simulação por RdP permite obter informação sobre o comportamento do sistema de controlo e o resultado da avaliação de desempenho dos ativos.

3.3.1 Identificação do sistema

Para dar lugar ao início do processo de modelação, é necessário um bom conhecimento do que deve ser modelado. O não conhecimento do todo pode colocar em causa o modelo, uma vez que o modelo produzido arrisca-se a não refletir a realidade.

Para a obtenção do diagrama do sistema, foram levadas em consideração as informações técnicas amplamente descritas na secção dedicada à caracterização do sistema de alimentação elétrica. De forma sucinta, repito, abaixo, descrições do funcionamento do sistema elétrico, assim como, é apresentado o esquema geral do sistema através da Figura 3.17 e da matriz de funcionamento do sistema de gestão (Figura 3.18).

- A alimentação ao edifício do hospital é estabelecida a partir da rede pública de MT, através de ramal aéreo estabelecido pela EDP.
- É estabelecido um ramal que liga ao posto de seccionamento junto ao posto de transformação.
- O posto de seccionamento é constituído por duas celas de corte, do tipo interruptor seccionador para fazer o anel, entrada e saída.
- O PT do hospital dispõe de uma cela de corte geral da instalação e de três transformadores secos de 1000 kVA cada.
- Tanto o QGBT do PT1 como o do PT2 possuem três barramentos, cada um deles alimentado individualmente por cada um dos transformadores, e ainda um quarto barramento alimentado pela UPS de apoio às instalações socorridas do hospital.
- O inversor IGTB fica constantemente sincronizado, estando, pois, preparado para permitir a transferência da carga do inversor sem qualquer interrupção. Em

caso de falha de rede, ou se esta estiver fora das tolerâncias admissíveis, a energia fornecida às instalações de utilização é garantida pelas baterias.

- Em caso de paragem do inversor IGBT, voluntária ou provocada por sobrecarga do inversor IGBT, a unidade UPS será automaticamente alimentada pela rede de reserva sem solução de alimentação ininterrupta.
- A alimentação das cargas ligadas a cada UPS é assegurada em contínuo pelo inversor IGBT, o qual, por sua vez, é alimentado pela rede do retificador/carregador CA/CC, que corrige o fator de potência, de forma a diminuir o consumo de energia reativa.
- Para complementar a configuração do sistema instalado no QGBT e dar ainda maior fiabilidade à exploração das instalações, os disjuntores interbarras motorizados possuem um *bypass* manual para que qualquer avaria no motor disjuntor não ponha em causa o fornecimento de energia elétrica.
- Os disjuntores interbarras motorizados podem ser comandados tanto pelo quadro de comando e transferência dos grupos eletrogéneos como pela gestão técnica, que recebe informação do regime de funcionamento dos grupos, para que a entrada em funcionamento dos grupos e a transferência de cargas para estes se faça de forma temporizada, isto é, as cargas só serão transferidas quando os grupos estabilizarem o seu regime de carga, o que evitará que estes “aninhem” no arranque.

3.3.2 Definição do sistema

O esquema em causa (Figura 3.17) traduz de forma simplificada o circuito, construído com base nas informações precedentes do sistema de alimentação em análise, onde se encontram representados e identificados todos os elementos de maior relevância para o bom funcionamento do circuito.

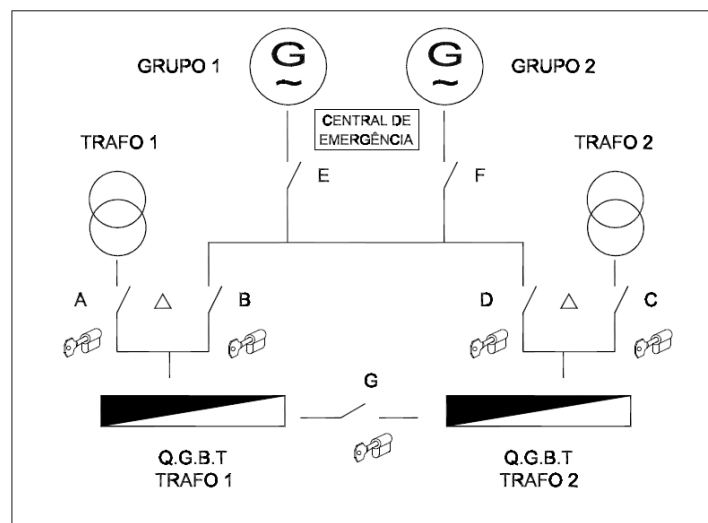


Figura 3.17 – Esquema geral simplificado do sistema elétrico

- *A*, *B*, *C* e *D* – Contactores com encravamentos eletromecânicos;
- *E* e *F* – Contactores;
- *G* – Interbarras.

MATRIZ DE FUNCIONAMENTO							
REGIME	A	B	C	D	E	F	G
NORMAL	1	0	1	0	0	0	1
	0	1	1	0	1	1	0
	1	0	0	1	1	1	0
	0	1	0	1	1	1	0
1 - Disjuntor fechado 0 - Disjuntor aberto							

Figura 3.18 – Matriz de funcionamento do sistema elétrico

A matriz de funcionamento exhibe a harmonização do funcionamento de acordo com a disponibilidade do sistema em cada momento em que se encontra a operar.

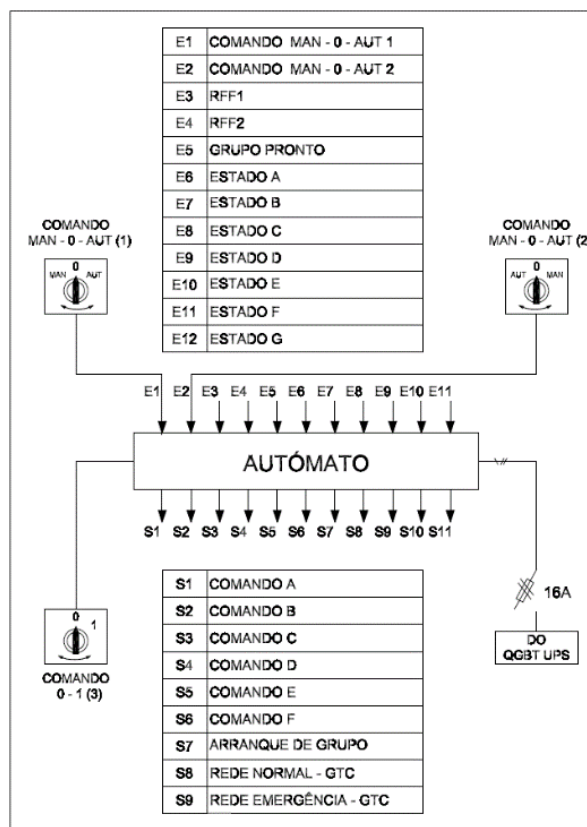


Figura 3.19 – Esquema do autômato de gestão do sistema

O esquema da Figura 3.19 demonstra a correspondência dos sinais de entrada e saída do autômato responsável pela gestão de atuação do sistema.

3.3.3 Modelação do sistema com Diagrama de Blocos Funcional

Um diagrama de blocos funcional é a base fundamental para o processo de criação do estudo do caso em RdP.

Com base nas informações do estudo do caso, foi gerado, através do *software* Visio, o modelo de diagrama de blocos funcional, do mecanismo de funcionamento dos equipamentos envolvidos no circuito do sistema elétrico a ser modelado em RdP.

Sendo o sistema a modelar caracterizado como complexo, o grau de dificuldade em criar uma RdP torna-se elevado. Mas, após ser gerado, o modelo de diagrama de blocos funcional traduz na forma esquemática o funcionamento de todo o sistema, proporcionando assim uma maior facilidade de compreensão e interpretação do caso, o que contribuirá para reduzir o grau de dificuldade da modelação da RdP.

O processo, ao ser modelado e, posteriormente, simulado, torna-se de fácil compreensão e com grande capacidade de demonstrar os principais pontos que carecem de maior atenção na análise do funcionamento geral do sistema.

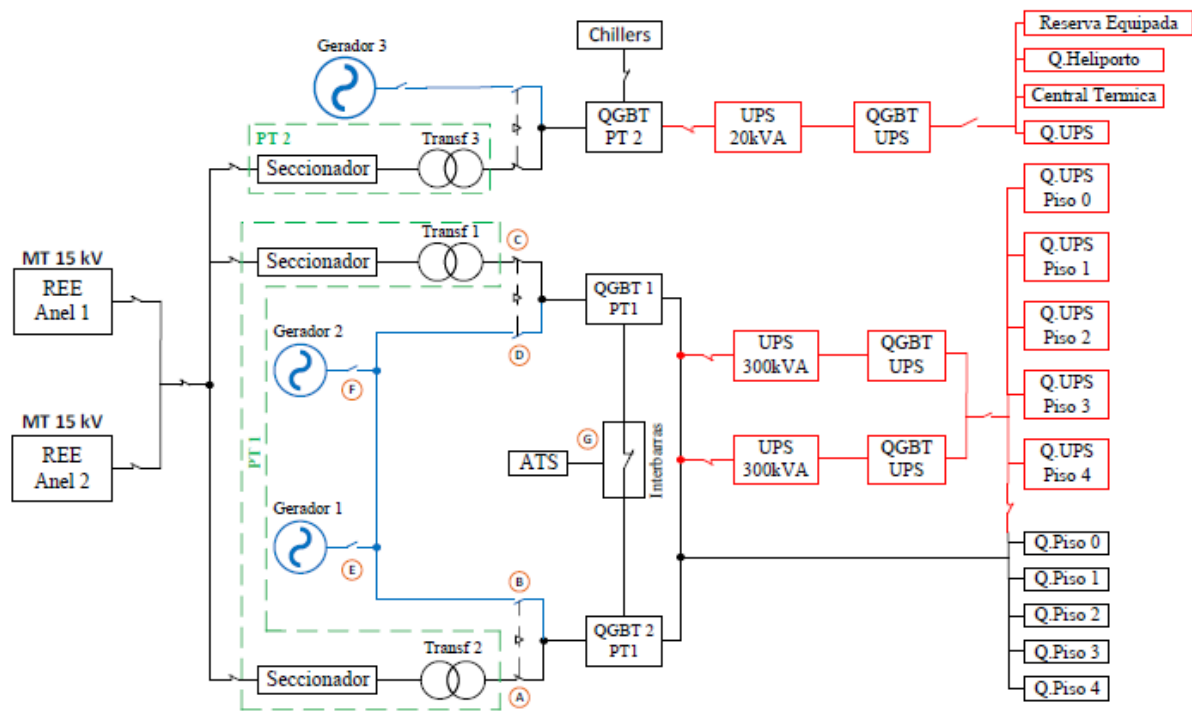


Figura 3.20 – Representação esquemática do Sistema de Alimentação de Emergência

3.4 Modelação do Sistema Elétrico do Hospital por Redes de Petri

A modelação é uma técnica que permite representar um sistema ou processo através de um gráfico, uma equação ou um *software*. A modelação de qualquer processo é um recurso muito importante para analisar e detetar falhas de projeto antes da sua implementação ou também para detetar falhas no funcionamento dos sistemas já implementados. Portanto, a modelação é um meio de reduzir taxas de falha, diminuir custos e minimizar atrasos das operações dos sistemas.

Neste caso específico, o principal objetivo da modelação do sistema por RdP é:

- Modelar o sistema real para análise de desempenho, fiabilidade e aperfeiçoamento.

Modelar um sistema simples não requer grande esforço, uma vez que, na maior parte dos casos, basta agrupar alguns tipos de modelos elementares numa única RdP. Por serem modelos simples e pequenos, também são de fácil análise, tanto graficamente quanto através da equação fundamental das RdP.

Em sistemas mais complexos, como é o caso em análise, o grau de dificuldade de modelação é elevado, do mesmo modo que encontrar a solução do sistema de equações do modelo é praticamente uma tarefa impossível sem a ajuda da simulação computacional.

Existem diferentes *softwares* que auxiliam na modelação, simulação e análise de RdP. Alguns deles exigem o conhecimento de programação na linguagem JAVA, tornando a sua utilização mais complexa e restrita para os potenciais usuários.

Para os objetivos propostos e, devido à complexidade do funcionamento do sistema, a opção do *software* para trabalhar a modelação e simulação da RdP recai sobre o *CPN Tools*.

O *CPN Tools* é uma ferramenta para edição, simulação e análise do espaço concetual e análise de desempenho de modelos *Colored Petri Nets* (CPN). O *CPN Tools* suporta modelos hierárquicos não dependentes do tempo e dependentes deste.

Sendo as redes de Petri, tradicionalmente, divididas em redes de Petri de baixo nível e redes de Petri de alto nível, o *CPN Tools* pertence à classe de redes de Petri de alto nível, que são caracterizadas pela combinação de redes de Petri com linguagens de programação. As redes de Petri de alto nível visam a sua implementação real, designadamente, porque permitem a construção de modelos compactos e parametrizados.

Para a representação dos modelos, o *CPN Tools* baseia-se na linguagem *Markup Language*. O *software* permite desenhar a rede, exportá-la para um arquivo gráfico e também possui recursos de simulação e análise. Possui ainda outras características que o tornam um *software* apelativo:

- É gratuito e independente do sistema operacional;
- É *open source*, permitindo assim a sua integração com outras ferramentas;
- Gera o gráfico de alcançabilidade;
- Efetua a análise das propriedades da rede.

A Figura 3.21 ilustra a *interface* gráfica do *software CPN Tools*.

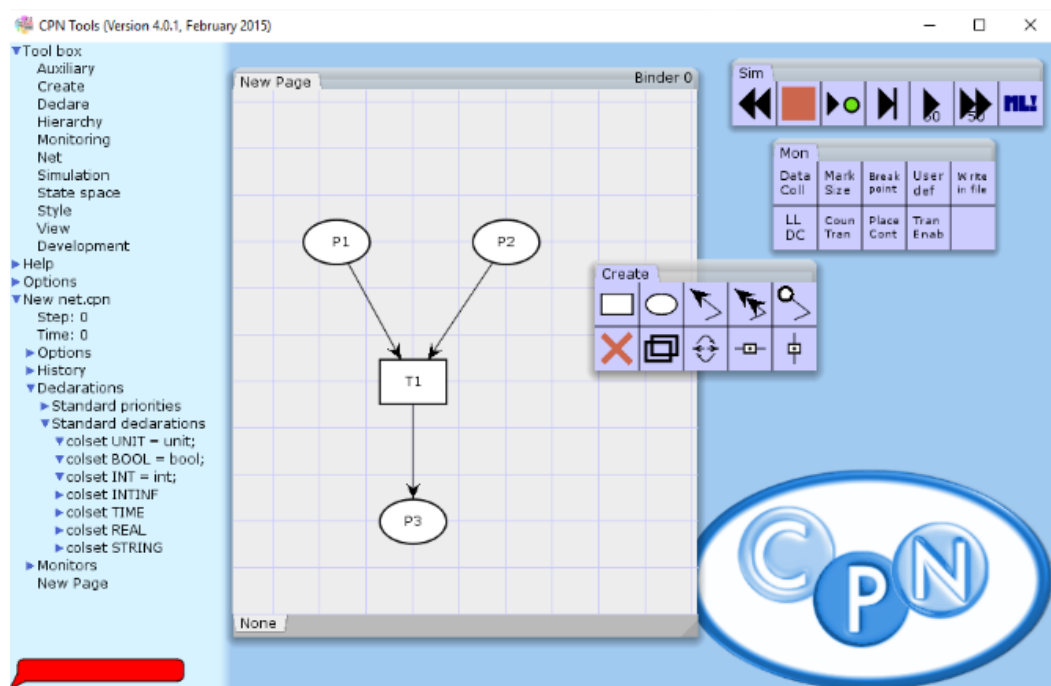


Figura 3.21 – Interface gráfica do *CPN Tools*

Embora neste projeto o objetivo seja a utilização da ferramenta Redes de Petri, porém, existem outras ferramentas (*Grafcet*, Cadeias de Markov, *Unified Modeling Language*) com objetivos semelhantes às RdP. É importante ressaltar que cada linguagem ou ferramenta tem aplicações específicas. Portanto, não há uma ferramenta melhor do que outra. Há apenas a que melhor se adequa ao tipo de sistema que se pretende modelar.

3.4.1 Simulação computacional

Esta secção tem como objetivo simular o sistema elétrico do hospital para analisar o desempenho e a fiabilidade da gestão do seu funcionamento.

O modelo simulado foi gerado de acordo com os elementos recolhidos durante as visitas no terreno, que podem, no entanto, em alguns sectores, carecer de informações com maior rigor. O essencial aqui é validar o uso da ferramenta *CPN Tools* que modela a RdP, para ser o ponto de partida no auxílio da gestão e análise de fiabilidade, em particular do grupo eletrogéneo e do grupo de emergência elétrica de uma unidade hospitalar.

Na rede concebida, cada tarefa do processo de funcionamento do sistema está reproduzida por transições e, em determinadas circunstâncias, assume-se que duas ou mais transições podem disparar em simultâneo.

A Figura 3.22 exibe a declaração de variáveis utilizadas no desenvolvimento do modelo.

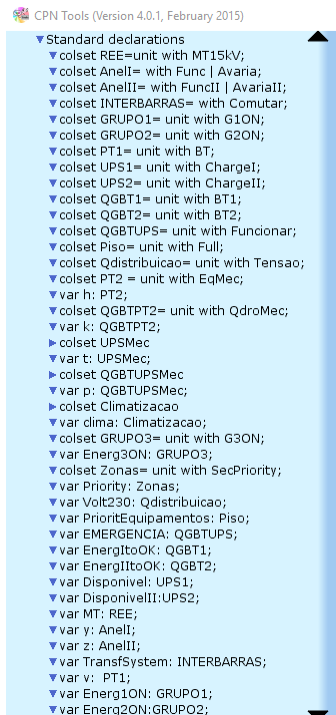


Figura 3.22 – Declaração de variáveis

Para proceder ao início da simulação do modelo, em que é necessário a disponibilização da tensão dos 15kV por parte da EDP, através de dois ramais distintos, foram modelados os lugares e as transições, conforme mostra a Figura 3.23.

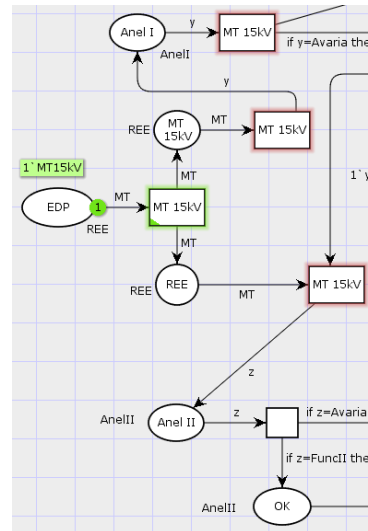


Figura 3.23 – Condição inicial

No lugar (EDP) responsável pelo início da simulação, é introduzido o *token*, habilitando desta forma a transição (MT 15kV) que representa a tensão nos ramais que fazem o transporte da mesma até às instalações do hospital. Neste caso, estando esse lugar marcado, automaticamente habilita a transição (MT 15kV) que, ao disparar o *token* primário, vai gerar diversas alterações na rede à medida que o percorre, de acordo com os parâmetros programados durante a construção do modelo.

Na etapa 1 (Figura 3.24), após o disparo inicial, vão ser criadas condições para que os lugares “REE” (Rede Elétrica Externa) sejam marcados e habilitados às transições “MT I”, ou seja, significa que essas redes já contêm tensão fornecida pela EDP, que poderá ser encaminhada para o hospital.

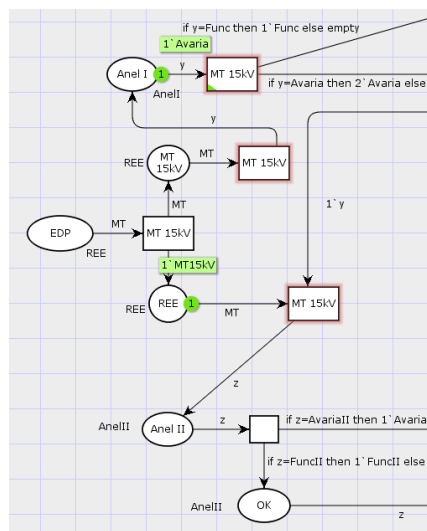


Figura 3.24 – Primeira etapa do token

Toda a descrição do funcionamento do sistema abaixo é feita com base na simulação nas figuras apresentadas, que servem de apoio ao longo da explicação de funcionamento do modelo.

Assumiu-se o “Anel I” como sendo preferencial para o fornecimento de energia e, assim a descrição da simulação do modelo vai centrar-se no percurso que os *tokens* terão de realizar a partir desse ponto para ilustrar o funcionamento de todo o sistema. Isto, uma vez que o “Anel II” só fornecerá energia ao sistema caso o “Anel I” não esteja a funcionar devido a avaria ou por motivos de intervenção para manutenção.

Tendo em conta que existe probabilidade de falha do fornecimento da energia elétrica por parte dos anéis, quer seja ela num único anel em determinado momento, quer seja em ambos os anéis ao mesmo tempo, impõe-se que a rede modelada tenha em consideração esta situação. Desta forma, foram impostas duas condições (avaria e funcionamento) ao estado de funcionamento dos anéis. Estas condições só estarão representadas nos lugares (Anel I e Anel II) aquando das suas marcações, ou seja, quando o *token* estiver nesses lugares, ele assumirá aleatoriamente uma das condições do estado de funcionamento como se pode constatar na Figura 3.24.

Na atual simulação podemos observar (Figura 3.25) que o “Anel I” se encontra avariado. Logo, ao proceder ao disparo da transição, o lugar “Avaria” receberá *tokens* e a transição “MT II” também ficará habilitada, significando assim que houve uma comutação de ramal.

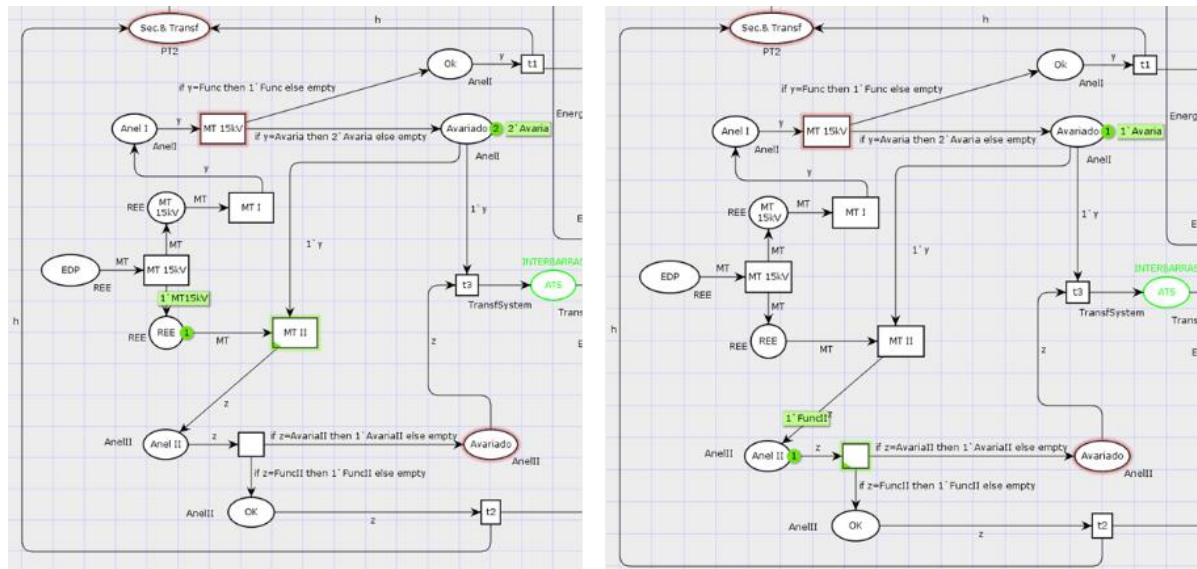


Figura 3.25 – Processo de comutação dos anéis

Estando o “Anel II” a funcionar, como indica a Figura 3.25, o percurso do *token* vai passar pelo “PT 1” e pelo “PT 2”, que são constituídos por seccionadores e transformadores. De seguida, o *token* é enviado para os lugares que representam o “QGBT 1” e o “QGBT 2”, indicando que a tensão de entrada (MT) foi transformada em baixa tensão nos postos de transformação (PT) e disponibilizada para o consumo interno do hospital. A partir dos quadros gerais de baixa tensão (QGBT 1 e 2) processa-se a distribuição da tensão, tanto para os quadros parciais dos pisos como para carregar as baterias das UPS’s centrais, concluindo-se deste modo o ciclo de modelação dos *tokens* nesse trajeto.

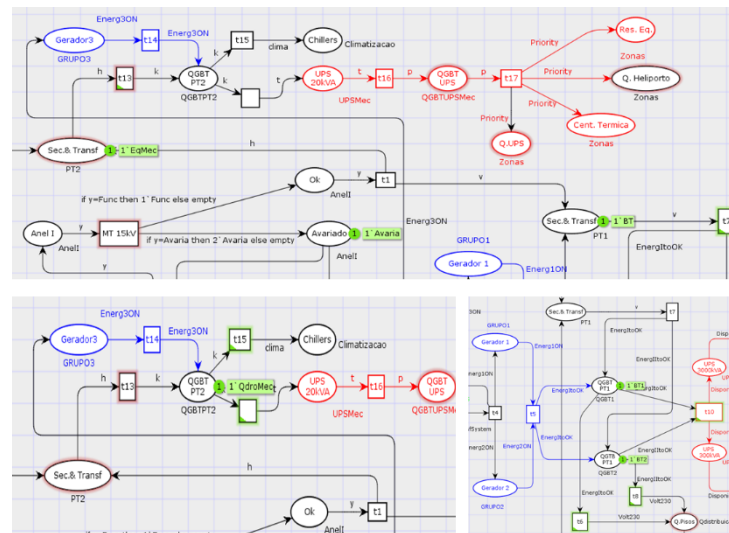


Figura 3.26 – Transferência de energia dos PT's para os QGBT's

No entanto, quando eventualmente a comutação do “Anel II” se encontrar no estado avariado, a informação é transmitida para o sistema automático de transferência (ATS), através do *token* processado pelo disparo de transição efetuado a partir dos lugares “avariados”, que, por sua vez, coloca em funcionamento os grupos eletrogéneos de emergência, para poder disponibilizar energia ao hospital. Durante o instante de interrupção (20 segundos), até que os grupos tenham disponibilidade para fornecer a energia elétrica, o fornecimento de energia à unidade é assegurado pelas UPS's.

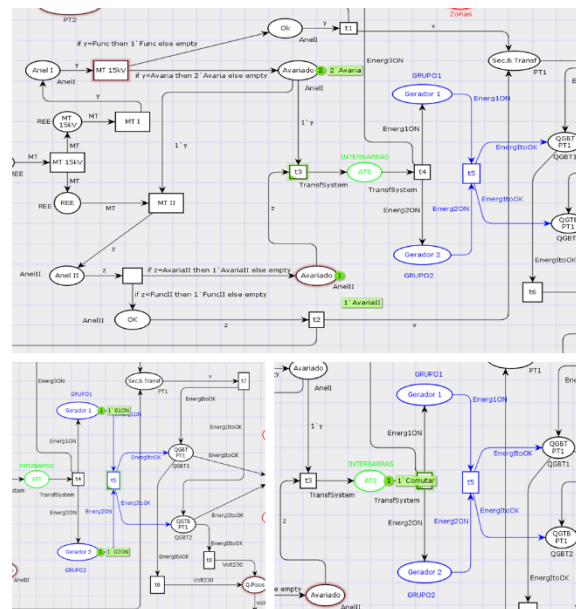


Figura 3.27 – Transmissão de informação de avarias dos anéis para o ATS

Caso ocorra algum problema no funcionamento dos geradores, as UPS's continuarão a assegurar o fornecimento de energia aos sectores classificados de sensíveis, devido aos riscos intrínsecos do colapso dos mesmos. As UPS's têm a capacidade de assegurar este fornecimento entre 15 a 60 minutos, conforme indicado na Tabela 3.1.

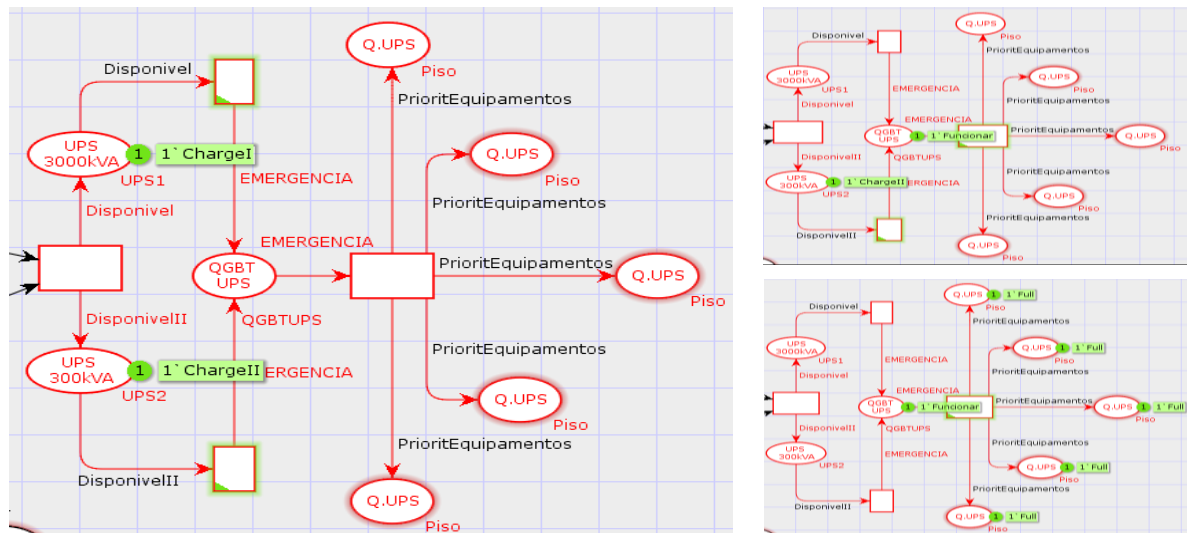


Figura 3.28 – Fornecimento de energia pelas UPS's

O detalhe importante da simulação é facto de se poder fazer uma leitura do sistema durante o seu funcionamento, onde se pode constatar a dependência que existe para que todo o processo prossiga em conformidade, devido à interligação dos sectores. Também nos oferece a capacidade de processar alterações no funcionamento do modelo, de modo a testar a fiabilidade do sistema caso ocorra algo análogo.

Devido ao facto de o ATS ser um sector de extrema relevância para o sistema, procedeu-se a uma alteração no modelo, de forma a simular a sua avaria e, de modo a perceber qual seria o impacto no funcionamento do sistema.

Durante a simulação teste em que se incutiu a alteração no funcionamento do ATS, induziu-se uma avaria no módulo, e constatou-se que essa ocorrência cria enormes constrangimentos de fiabilidade no funcionamento do sistema elétrico do hospital.

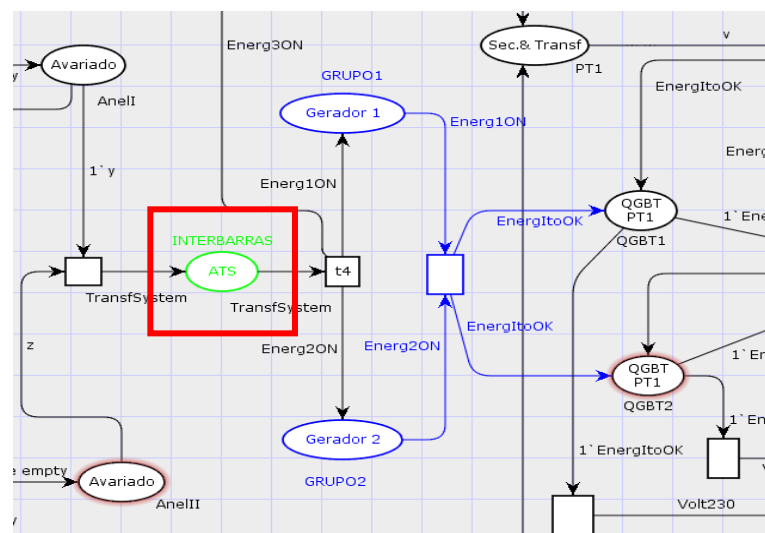


Figura 3.29 – ATS avariado

Num caso extremo, correspondente a um corte de energia e a uma avaria do ATS em simultâneo, a alimentação do hospital será assegurada através das UPS's centrais. Neste cenário, o tempo de autonomia das UPS's é um aspeto que não deve ser descurado, uma vez

que as UPS's centrais garantem, no máximo, uma autonomia do sistema durante 30 minutos, limitando, desta forma, o tempo de intervenção da equipa técnica para realizar manualmente as tarefas que competiam ao ATS executar e/ou para reparar a anomalia.

Ao realizar de forma manual a gestão e comutação de fornecimento de energia das três fontes (anel I, anel II e grupos de geradores), poderá colocar-se a fiabilidade de funcionamento em causa.

Caso não seja possível efetuar a reparação da anomalia do ATS durante um período de tempo curto, o sistema pode ficar indisponível, levando ao colapso do fornecimento de energia para a unidade hospitalar.

CAPÍTULO 4. SOLUÇÃO PROPOSTA

Neste capítulo, será proposta uma ação recomendada para minimizar os riscos do setor considerado sensível e crítico após as simulações do sistema utilizando as redes de Petri.

A partir da simulação modelada na RdP, conclui-se que o módulo do sistema automático de transição é um ponto crítico e, atendendo à importância que representa para o bom desempenho do funcionamento do sistema elétrico do caso de estudo, é aconselhável efetuar um estudo mais pormenorizado e com o maior rigor possível, já que, de forma isolada, o disjuntor Interbarras está sujeito a ocorrências de avarias associadas à incapacidade de comutação das cargas provenientes do transformador 1 para o transformador 2.

Com a alteração efetuada no modelo, conclui-se que seria aconselhável tomar algumas medidas de redução do risco inerente a este setor, nomeadamente, a implementação de redundância do sistema automático de transferência.

A redundância aqui proposta para aumentar a fiabilidade do sistema passa por instalar mais um módulo de ATS em paralelo, como pode ser visto na representação esquemática da Figura 4.1. No entanto, antes de proceder às alterações sugeridas, é aconselhável efetuar uma avaliação da importância de adaptar a redundância, recorrendo aos cálculos do *Mean Time Between Failures* (MTBF) e do *Mean Time To Repair* (MTTR).

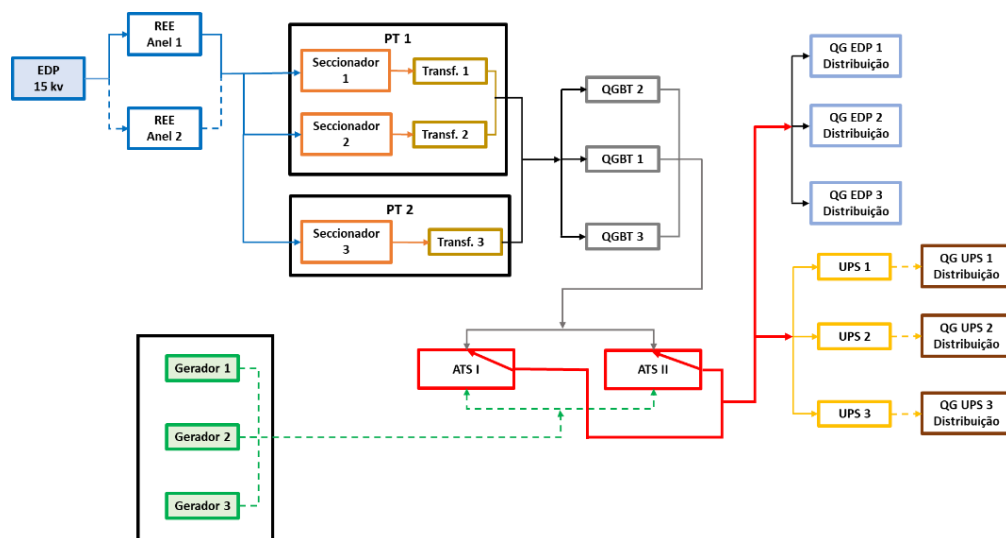


Figura 4.1. – Representação esquemática com redundância do ATS

Ao implementar um sistema redundante, ou paralelo, caso falhe qualquer um dos seus componentes, isso não implica a falha do sistema, ou seja, o sistema só falhará se todos os itens falharem ao mesmo tempo.

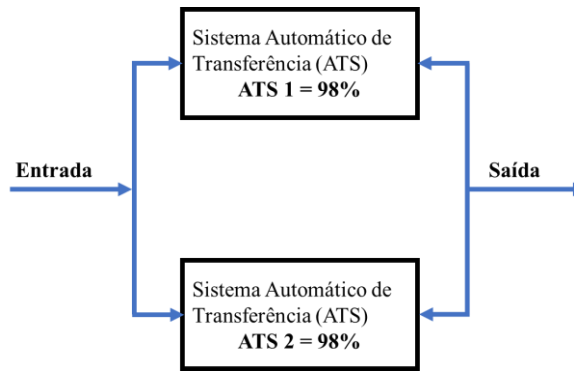


Figura 4.2 – Sistema paralelo

A fiabilidade deste sistema, para uma tarefa de duração t , é dada pela expressão:

$$R_{Sistema}(t) = 1 - [(1 - R_{ATS1}(t))(1 - R_{ATS2}(t))] \quad (4.1)$$

A probabilidade de falha do sistema é dada por:

$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (4.2)$$

Considerando o diagrama do sistema paralelo da Figura 4.2 como sendo o sistema de redundância proposto, e admitindo que a fiabilidade de ambos os ATS é de 98% a um $t = 1$ ano, a fiabilidade geral do sistema num ano será a seguinte:

$$\begin{aligned}
 F_s(t) &= \prod_{i=1}^n F_i(t) \\
 R_{Sistema}(t) &= 1 - [(1 - R_{ATS1}(t)) * (1 - R_{ATS2}(t))] \\
 \Leftrightarrow R_{Sistema}(t) &= 1 - [(1 - 0.98) * (1 - 0.98)] = 0.9996 \text{ (99.96\%)}
 \end{aligned}$$

A partir dos valores apresentados pelos cálculos precedentes demonstram-se os ganhos em termos de fiabilidade ao adotar o sistema paralelo.

Assim sendo, pode afirmar-se que, adotando o sistema redundante, incrementar-se-á a fiabilidade de forma significativa no sistema de alimentação de energia elétrica da unidade hospitalar, reduzindo-se de forma significativa a probabilidade de ocorrência de situações de avaria do ATS que possam colocar em causa o bom funcionamento da unidade hospitalar.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O nível de exigência imposta atualmente relativamente à manutenção é impreterível à implementação de sistemas de gestão da manutenção apetrechados de metodologias, os quais visam estabelecer a sequenciação do risco das falhas e o aumento da fiabilidade.

Tendo em mente que o desafio lançado na realização da presente dissertação abarca uma abordagem da análise da fiabilidade na gestão das operações do sistema de potência de uma unidade hospitalar de padrão europeu, recorrendo às redes de Petri como ferramenta de análise, o nível do desafio era bastante alto, uma vez que, até ao momento da elaboração do respetivo estudo não se conhecia nenhum estudo que abordasse o tema em causa.

A utilidade e pertinência das redes de Petri na modelação de sistemas elétricos de potência, no caso presente, aplica-se a um grande hospital, mas pode ser generalizada a qualquer outra organização, independentemente da sua natureza.

O estudo de caso elaborado sob a ferramenta *CPN Tools* comprovou que as redes de Petri podem ser bastantes eficientes, permitindo que sejam detetadas possíveis ocorrências de avarias, levando a uma prevenção que se reflete no aumento da fiabilidade do funcionamento do sistema.

Por consequência, a dissertação enfatiza a importância das redes de Petri como uma ferramenta muito poderosa na área da gestão da manutenção, proporcionando a análise e a simulação de sistemas baseados em eventos discretos, e permitindo incrementar a fiabilidade dos sistemas e dos ativos individualmente.

Nesta medida, e devido à capacidade de representação gráfica e matemática, e à possibilidade de realizar simulações e verificações, as redes de Petri caracterizam-se como sendo um poderoso método de modelação, sendo adequadas para obter modelos de simulação com às características mais importantes de um sistema.

Face ao referido, e considerando que os resultados obtidos com a realização deste estudo de caso foram satisfatórios, conclui-se que realmente as redes de Petri como ferramenta de análise conferem potencial para serem uma ótima solução para contribuir para o aumento de fiabilidade na gestão das operações do sistema de potência de uma unidade hospitalar.

Embora a realização deste estudo tenha sido feita unicamente de forma qualitativa e com base no conhecimento do funcionamento do sistema adquirido aquando das visitas ao terreno, e não dispondo de quaisquer históricos de avarias de nenhum dos equipamentos que constituem o sistema, julga-se que, mesmo assim, obtiveram-se resultados que podem considerar-se muito positivos.

Como sugestão para futuros trabalhos propõe-se testar o uso de outros tipos de *softwares* para a modelação e simulação de redes de Petri estocásticas, tais como o *HIPS Tools*. Também seria importante realizar uma análise FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e uma análise por Árvore de Falhas, de modo a tirar outras conclusões sobre o funcionamento do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barros, J. P. (2001). Introdução à modelação de sistemas utilizando Redes de Petri. Beja, Portugal: Instituto Politécnico de Beja - Escola Superior de Tecnologia e Gestão. <http://gres.uninova.pt/~jpb/textos/pn.pdf> (Acedido em 2018.10.02).
- [2] Cardoso, J., & Valette, R. (1997). Redes de Petri. Florianópolis, Brasil. https://www.academia.edu/36254160/Redes_de_petri_cardoso_valette (Acedido em 2017.08.02).
- [3] Chister, A. H. (1984). An operational research approach to planned maintenance: Modelling P.M. for a vehicle fleet. *Journal of the Operational Research Society*. 35: 967. <https://doi.org/10.1057/jors.1984.193>.
- [4] Cho, D. I. (1991). "A survey of maintenance models for multi-unit systems,". *European Journal of Operation Research*, 51, 1-23. Obtido de eco.nomia: <http://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/estrategias> (Acedido em 2017.08.02).
- [5] Das, A. N. (2010). "Preventive replacement models: an overview and their application in process industries,". *European Journal of Industrial Engineering*, Inderscience Enterprises Ltd, 4, n.3, 280-307.
- [6] David, R., & Alla, H. (1992). *Petri Nets and Grafcet: Tools for modelling discrete event systems*. Prentice Hall. ISBN-10: 013327537X. ISBN-13: 978-0133275377.
- [7] David, R., Alla, & Hassane. (2010). *Discret, Continuous, and Hybrid Petri nets*. (Springer, Ed.) Discret, Continuous, and Hybrid Petri nets. ISBN 978-3-642-10669-9.
- [8] Dekker, R. A. (1996). "Applications of maintenance optimization models: a review and analysis,". *Reliability Engineering and System Safety*, Volume 51, Issue 3, March, Pages 229-240. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00076-3).
- [9] Francês, C. R. (2003). Introdução às Redes de Petri. Pará, Brasil: LACA - Universidade Federal do Pará. https://dca.ufpa.br/~affonso/FTP/DCA409/redes_de_petri.pdf (Acedido em 2017.08.02).
- [10] Gomes, L. F. (1997). Redes de Petri Reactivas e Hierárquicas - Integração de formalismos no projecto de sistemas reativos de tempo-real. https://run.unl.pt/bitstream/10362/2560/1/Gomes_1997.pdf (Acedido em 2017.08.02).
- [11] Ho, Y. C. (1987). Performance evaluation and perturbation analysis of discrete event dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Volume: 32 , Issue: 7 , Jul 1987. DOI: 10.1109/TAC.1987.1104665.
- [12] Kobbacy, K. A. H., Percy, D. F., Fawzi, B. B. & Ascher, H. E. (1997). A full history of proportional hazards model for preventive maintenance scheduling. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\(SICI\)1099-1638\(199707\)13:4%3C187::AID-QRE98%3E3.0.CO;2-L](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/(SICI)1099-1638(199707)13:4%3C187::AID-QRE98%3E3.0.CO;2-L) (Acedido em 2018-01-10).
- [13] Maciel, P. R. M., Lins, R. D., & Cunha, P. R. F. (1996). Introdução às Redes de Petri e Aplicações. Campinas: UNICAMP - Instituto de Computação. https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Maciel/publication/247935030_Introducao_as_red

- es_de_Petri_e_aplicacoes/links/53fe1afc0cf283c3583b6a83/Introducao-as-redes-de-Petri-e-aplicacoes.pdf (Acedido em 2017.07.08).
- [14] Marranghello, N. (2005). Redes de Petri: Conceitos e Aplicações. DCCE/IBILCE/UNESP. https://www.academia.edu/2164286/Redes_de_petri_Conceitos_e_aplica%C3%A7%C3%B5es (Acedido em 2017-09-10).
- [15] Morasca, S., Pezzé, M., & Trubian, M. (1991). Timed High-Level Nets. Volume 3. *The Journal of Real-Time Systems*. https://www.researchgate.net/publication/220414398_Timed_High-Level_Nets (Acedido em 2017-10-10).
- [16] Murata, T. (1989). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. Proceedings of the IEEE. <http://inst.eecs.berkeley.edu/~ee249/fa07/discussions/PetriNets-Murata.pdf>. (Acedido em 2017-12-05).
- [17] Pereira Didlet, F. J., & Sena Vicente a, F. M. (2016). Manutenção de Instalações Técnicas. Espanha: Publindustria. ISBN 978-989-723-140-7.
- [18] Peterson, J. L. (1977). "Petri Nets". *ACM Computing Surveys*, vol. 9, n. 3. <http://www.cs.rpi.edu/courses/spring04/dci/peterson.pdf> (Acedido em 2017-12-08).
- [19] Peterson, J. L. (1981). Petri Net Theory and the Modeling of Systems. Prentice Hall. ISBN 0-13-661983-5.
- [20] Reisig, W. (2013). Understanding Petri Nets. Berlin, Germany: Springer. ISBN 978-3-642-33277-7.
- [21] Scarf, P. A. (2003). "Block replacement policies for a two-component system with failure dependence,". *Naval Research Logistics*, 50, 70-87. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nav.10051> (Acedido em 2018-02-21).
- [22] Suárez, M. Silva (1985). Las Redes de Petri en la Automática y la Informática. Madrid, Espanha: Editorial AC, D.L. ISBN 84-7288-045-1.
- [23] Torres Farinha, J. M. (2011). Manutenção - A Terologia e as Novas Ferramentas de Gestão. Coimbra: Monitor. ISBN 978-972-9413-82-7.
- [24] Valenzuela, R. (2014). COMPACT RELIABILITY AND MAINTENANCE MODELING OF COMPLEX REPAIRABLE SYSTEMS. Georgia: Georgia Institute of Technology. <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/51850/VALENZUELAVEGA-DISSERTATION-2014.pdf> (Acedido em 2017-09-10).
- [25] Wang, J. (1998). TIME PETRI NETS - Theory and Application. Miami, Florida: SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC. ISBN 978-1-4613-7531-9.
- [26] Zhou, M., & Zurawski, R. (1995). Introduction to Petri nets in flexible and agile automation. SRNGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC. ISBN 978-1-4613-5938-8.
- [27] Zio, E. (2009). Reliability Engineering & System Safety - Reliability Engineering: Old problems and new challenges. pp. 120-145. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832008001749> (Acedido em 2017-10-10).

- [28] Zurawski, R., & Zhou, MC. (Dezembro de 1994). Petri Nets and industrial applications: a tutorial. IEEE Transactions on Industrial Electronics. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/334574> (Acedido em 2018-01-10).